



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

# **PROPUESTA PARA EL CONTROL DE AVANCE DEL TRABAJO EN PROYECTOS DE EXCAVACIÓN USANDO FOTOGRAFÍAS DIGITALES**

**Memoria para optar al título de ingeniero civil.**

**Valeria Constanza Isamitt Parra**

**Profesor Guía: Mauricio Toledo**

**SANTIAGO – CHILE**

**Marzo, 2017**



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO**

**Facultad de Ingeniería**

**Ingeniería Civil**

## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD**

Yo, Valeria Isamitt, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, Marzo 2017

---

Firma del alumno.

## **AGRADECIMIENTOS**

En el camino de la vida son pocos los momentos que nos sentamos a reflexionar de cómo hemos llegado hasta dónde estamos y es por eso que quiero aprovechar esta oportunidad del término de la carrera para agradecer a todos los que me apoyaron en el camino, empezando por mi madre que siempre estuvo conmigo en los momentos buenos y en los momentos malos y que nunca me dejó rendirme con sus palabras de aliento. A mi padre por enseñarme a usar la intuición y la lógica de la ingeniería, a mi hermano por cuidarme y protegerme siempre, a mi cuñada por llegar a nuestra familia y enseñarme otra perspectiva de la vida y por traer a mis sobrinas que son la luz de nuestras vidas. Además agradecer a mi abuela por regalarme cada vez que pudo y a mi abuelo por cuidarnos desde el cielo.

También agradecer a los amigos con los que recorrí este camino, nunca olvidare esas tardes de estudio interminables y a Diego por tener una paciencia de oro en los periodos de pruebas.

Y por último a mi profesor guía Mauricio Toledo por creer en mí sin su apoyo, determinación y exigencia no hubiésemos podido lograr este trabajo.

# Índice General

<b>1. Resumen ejecutivo .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Abstract.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Introducción.....</b>	<b>8</b>
<b>3. Revisión de la literatura.....</b>	<b>10</b>
<b>4. Preguntas de Investigación e hipótesis .....</b>	<b>12</b>
Pregunta general .....	12
Preguntas específicas .....	12
Hipótesis .....	12
<b>5. Metodología .....</b>	<b>13</b>
<b>5.1. Método de control de avance actual .....</b>	<b>14</b>
5.1.1. Caso de estudio de una excavación.....	14
5.1.2. Práctica actual en un caso estudio .....	14
5.1.3. Estimación cualitativa de errores .....	15
5.1.4. Calculo de Volumen .....	15
<b>5.2. Método de control de avance propuesto .....</b>	<b>16</b>
5.2.1. Experimentación previa .....	16
5.2.2. Método propuesto.....	19
<b>6. Resultados .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1. Resultado de estructuración .....</b>	<b>24</b>
<b>6.2. Resultados numéricos .....</b>	<b>29</b>
<b>6.3. Resultados de forma .....</b>	<b>36</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>39</b>
<b>7.1. Contribución al conocimiento.....</b>	<b>39</b>
<b>7.2. Importancia Práctica.....</b>	<b>39</b>
Limitaciones y futuras investigaciones .....	40
<b>Bibliografía.....</b>	<b>41</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo A: Ejemplos de set fotográficos para cada semana.....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo B: Malla y nube de puntos por fecha .....</b>	<b>48</b>
<b>Anexo C: Plano de obra.....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo D: Estimacion de error de maquinaria. ....</b>	<b>55</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Fotografías que muestran cómo se realiza la extracción de terreno en la actualidad. ....	9
<b>Figura 2.</b> Muestra de una planilla que se utiliza para contar camiones .....	10
<b>Figura 3.</b> En la figura se puede ver la realización de un control de avance con fotografías superpuestas. <b>Fuente:</b> (Golparvar-Fard, 2010).....	11
<b>Figura 4.</b> Tareas de investigación .....	13
<b>Figura 5.</b> Planilla para el control de avance actual .....	15
<b>Figura 6.</b> Objeto a representar en nube de puntos. ....	16
<b>Figura 7.</b> Experimentación previa donde se pueden notar los agujeros de un cubo de madera por tomar las fotos desde una sola posición. ....	17
<b>Figura 8.</b> Posiciones incorrectas y correctas. ....	17
<b>Figura 9.</b> Experimento al aire libre.....	18
<b>Figura 10.</b> En la experimentación previa al exterior con cajas se puede notar los agujeros producidos por sombras. ....	18
<b>Figura 11.</b> Posiciones para la toma de fotografías .....	20
<b>Figura 12.</b> Posiciones reales de toma de fotografías. Día 2016/02/04 N° de puntos: 1.026.568 cantidad de fotografías: 90.....	20
<b>Figura 13.</b> Nube de puntos Día 2016/01/27 N° de puntos: 1.482.289 cantidad de fotografías: 72.....	21
<b>Figura 14.</b> Malla tridimensional Día 2016/01/27 N° de puntos: 1.482.289 cantidad de fotografías: 72.....	22
<b>Figura 15.</b> MCAEP: Método de control de avance de excavaciones Propuesto. ....	23
<b>Figura 16.</b> Mapa conceptual del método de control de avance de excavaciones propuesto. ....	25
<b>Figura 17.</b> Nube de puntos de la retroexcavadora	
<b>Figura 18.</b> Malla tridimensional de retroexcavadora .....	29
<b>Figura 19.</b> Volumen geométrico acumulado en obra v/s Volumen calculado por software. ....	32
<b>Figura 20.</b> Comparación de diferencia de volúmenes.....	34
<b>Figura 21.</b> Estimación del esponjamiento.....	36
<b>Figura 22.</b> Ficha de cotejo.....	38

## Índice de Tablas

Tabla 1: Estimación porcentaje error de volumen .....	30
Tabla 2: Comparación volumen geométrico V/S volumen calculado por software.....	31
Tabla 3: Diferencia de volúmenes.....	33
Tabla 4: Estimación del esponjamiento.....	35

# 1. Resumen ejecutivo

En la práctica actual los proyectos de excavaciones se caracterizan por tener un control deficiente en su control de avance. Esto incluye estimaciones del progreso del trabajo diario por medios indirectos tales como: registros manuales de movimientos de camiones, estimaciones de espolamiento del suelo y mediciones topográficas ocasionales (generalmente al inicio y al final de los proyectos).

En este estudio proponemos un procedimiento para calcular el volumen de terreno extraído y el control de avance mediante el uso de fotografías digitales geo-referenciadas tomadas en el sitio de construcción. Esta metodología ayuda a los gerentes de construcción a mejorar el control del progreso de las excavaciones y sistematiza los registros de excavación. El procedimiento se basa en la revisión de la literatura, la experiencia adquirida a partir de experimentos controlados y su aplicación en un caso de estudio.

Con un esfuerzo relativamente bajo (aproximadamente 3 horas por semana), la propuesta nos permitió medir el progreso del trabajo de excavación con alrededor de 50 fotos digitales geo-referenciadas con una precisión de alrededor de 6-10% en comparación con la estimación de volumen de excavación tradicional obtenida de los registros del movimiento de camiones. Los mejores resultados se obtuvieron para grandes movimientos de tierra registrados semanalmente. La precisión disminuyó para movimientos de tierra pequeños (por ejemplo, control de progreso de trabajo diario). La propuesta incluye recomendaciones para capturar las fotos digitales; Formación de un modelo de nube de puntos utilizando software fotogramétrico; Formación de un modelo de malla y cálculo del volumen de excavación. Se incluyen las consideraciones de obstrucción de equipos de construcción y geometrías complejas.

## 1.1. Abstract

Current practice in excavation projects is characterized by a deficient control of work progress that includes estimates of daily work progress by indirect means such as manual records of truck movements, estimates of soil swelling and occasional topographic measurements (usually at start and end of projects).

In this article we propose a procedure to calculate earth work volume and progress by using geotagged digital photographs taken at the construction site. This methodology helps construction managers to improve excavation progress control and it systematizes excavation records. The procedure is grounded on literature review, the experience gained from controlled experiments and its application on a case study.

With a relatively low effort (approx. 3 hrs.) the proposal enabled us to measure excavation work progress from around 50 geotagged digital photos with a precision of about 8-10% as compared to the traditional excavation volume estimate obtained from truck movement records. Best results were realized for large earth movements recorded on a weekly basis. Precision decreased for small earth movements (e.g., daily work progress control). The proposal includes recommendations for capturing the digital photos; formation of a point cloud model using photogrammetric software; formation of a mesh model and calculation of the excavation volume. Considerations for obstructing construction equipment and complex geometries are included.

## 2. Introducción

A través de los años las construcciones han ido cambiando en función de las necesidades de la población, en el caso de Chile con el aumento de la centralización en las ciudades hemos visto como el paisaje de la ciudad se ha poblado de edificios habitacionales y oficinas, ha sido un desafío para diseñadores e ingenieros optimizar los tiempos de edificación. Así como las construcciones han tomado altura, para aprovechar mejor el terreno también han tomado profundidad hacia el subsuelo, para incorporar estabilidad, estacionamientos y bodegas a los edificios.

Luego de la revolución industrial a mediados del siglo XVIII cuando se creó el concepto de control de avance para aumentar las producciones en masa, donde la construcción a inicio de 1900, empezó a aplicar estos conceptos a las obras, el que sin duda aportó a realizar una mejor planificación de las edificaciones. Sin embargo, con frecuencia se aprecian descoordinaciones, y retrasos en esta proyección.

Para dar inicio a una edificación se necesita comenzar con una excavación. Pero la ejecución de las excavaciones se han quedado atrás en el progreso de las tecnologías para el control de avance, ya que la manera en que habitualmente se realiza es contando el volumen de cada camión que sale de la obra con terreno extraído.

En este sentido es posible considerar si el método para fiscalizar el control de avances es adecuado, y si al modificar éste se podrá realizar una mejor planificación de la obra. Actualmente, el método de control de avance de excavación de la obra más usado es considerar la capacidad de la tolva de cada camión que sale de la obra con terreno extraído y el nivel de esponjamiento del terreno. También esta medición puede realizarse con topografía las que se utiliza en la etapa inicial, intermedia y final de la excavación.

Este estudio comienza observando el modo actual que se utiliza para medir el control de avance de excavaciones como se puede ver en la Figura 1, el que luego de una revisión de la literatura se pretende mejorar utilizando un método digital más objetivo. Al ir a observar una excavación y estudiar el proceso de cálculo de volumen, se formuló la idea de que se podría utilizar la fotogrametría para calcular el volumen de manera diferente, debido a la geometría que presenta la excavación y la accesibilidad que podría prestar este medio para el cálculo de volumen.





**Figura 1.** Fotografías que muestran cómo se realiza la extracción de terreno en la actualidad.

El desarrollo de las nuevas tecnologías de información ha permitido que técnicas antiguas como la fotogrametría también hayan evolucionado transformándose hacia la era digital, debido a esto podemos preguntarnos si es posible utilizar la fotogrametría para mejorar el control de avance de una excavación.

Es así que para llevar a cabo esta investigación se desarrolló una metodología de trabajo, la que busca facilitar el entendimiento del lector de cómo se efectuó el estudio. Luego de la revisión de la literatura se hizo una experimentación previa de lo aprendido en la revisión de la literatura, después se realiza una aplicación a un caso de estudio donde se indagó en el funcionamiento real de la excavación y con toda esta información se pudo crear un método de control de avance propuesto para una excavación usando fotografías digitales para calcular volumen excavado.

#### Problema observado

A través de los años se ha establecido como práctica recurrente el conteo de camiones que es un método de control de avances de excavación de donde se desprenden los siguientes problemas:

- Cálculo deficiente del volumen extraído.
- Falta de registro periódico del control de avance en la excavación

### 3. Revisión de la literatura

En los procedimientos actuales las excavaciones se desarrollan de manera mecánica sin pensar que se pueda producir algún error en su ejecución, es por esto que es relevante tener un buen control de avance. Actualmente los controles de avance de volumen extraído se realizan contando movimiento de camiones como se vio en la Figura 1 durante la excavación o por medio de mediciones topográficas esporádicas (Matabenitez, 2015), (Moscozo, 2011). Estos procedimientos son registrados por el cuidador de la obra en documentos informales, los cuales pueden causar conflicto dentro del desarrollo de la excavación pudiendo así afectar al cálculo del volumen extraído final como se ve en la Figura 2.

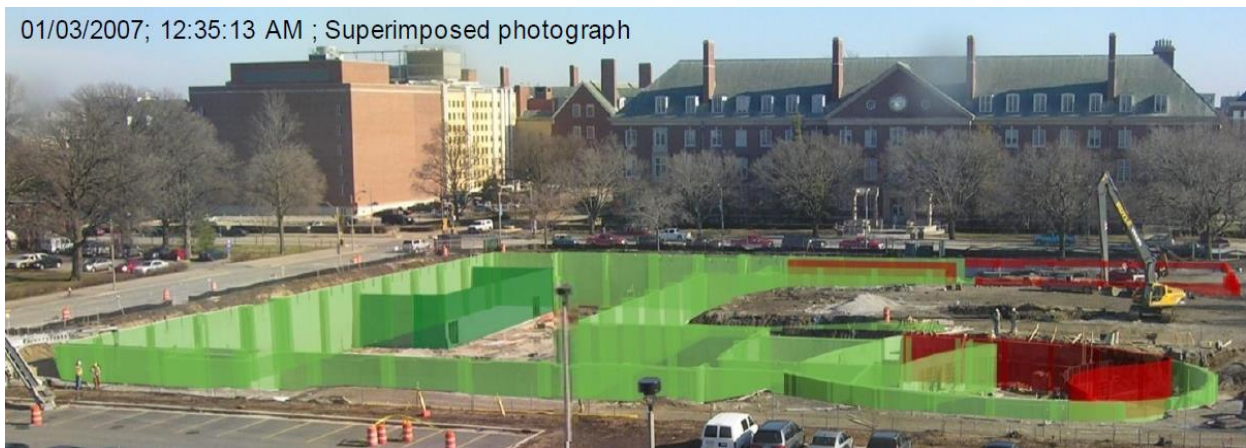
NOMBRE	RUT	MODELO CAMIÓN	COLOR	PATENTE	M3
HORACIO MARCELO TAPIA VIVALLOS	12.322.951	7 RENAULT	AMARILLO	BKVH-54	22
SEBASTIAN DAVID MORALES ROJAS	18.157.334	1 RENAULT	AMARILLO	BKVH-58	23
HERNAN ALEJANDRO DIAZ MOLINA	6.183.071	5 VOLKSWAGEN	BLANCO Y ROJO	FXHD-55	14
RODRIGO RICARDO RIVERA BUSTAMANTE	16.055.497	K SCANIA	ROJO FUEGO	GTGW-74	15
GONZALO JAVIER GOMEZ YANEZ	15.700.388	7 NISSAN	AMARILLO	TY-4416	14
JAVIER SEGUNDO GOMEZ TOLEDO	5.865.256	3 NISSAN	AMARILLO	LP-8096	14
LUIS ALBERTO GOMEZ TOLEDO	6.602.944	1 NISSAN	AMARILLO	TY-4415	14

*Handwritten notes:*  
 JOSE ROJAS ADAMS  
 15.152.414 NISSAN  
 RETIRO = TOTAL 574 m<sup>3</sup>

**Figura 2.** Muestra de una planilla que se utiliza para contar camiones

**Fuente:** Fotografía extraída durante el proceso de conteo de camiones en obra.

La fotogrametría digital (Jauregui, 2009) es un método que podría mejorar la manera en que se ejecuta este control de avance debido a que se puede captar la información en fotografías para transformarla a un modelo de tres dimensiones. Normalmente el modelo en tres dimensiones se utiliza antes de desarrollar el proyecto para poder planificar la obra y poder visualizar posibles errores de ejecución (Matabenitez, 2015). Por otro lado el modelo en tres dimensiones también puede ser usado para realizar control de avance de obra. Golparvar-Fard (2010) realizó un control de avance con fotografías para la obra gruesa de una construcción, la que consiste en tomar fotografías y luego con el software Revit designarle un elemento en tres dimensiones como se puede ver en la Figura 3.



**Figura 3.** En la figura se puede ver la realización de un control de avance con fotografías superpuestas.  
**Fuente:**(Golparvar-Fard, 2010)

“La fotogrametría es la técnica que consigue información métrica fiable a partir de fotogramas, y cuya principal característica proviene, pues de su fuente de información, la fotografía.”(Build et al, 2003).

Para realizar una fotogrametría, en primer lugar, es necesario sacar fotografías al objeto a dimensionar y luego procesar estas imágenes para obtener un modelo en tres dimensiones. El proceso de toma de fotografías se puede realizar de varias maneras, las principales formas son: aérea desde un dron o helicóptero, a nivel de suelo con cámara digital o un láser escáner. Posteriormente para realizar la nube de puntos se debe hacer una reconstrucción con todas estas imágenes con un software que crea el modelo en tres dimensiones.

Este último crea una nube de puntos desde las fotografías. La nube de puntos es “una estructura de datos utilizada para representar una colección de puntos multidimensionales y es comúnmente usado para representar datos tridimensionales. En una nube de puntos 3D, los puntos por lo general representan los ejes X, Y y Z, coordenadas geométricas de una superficie” (Point Cloud Library, 2011).

A partir de la nube de puntos se crea una malla tridimensional, Y para esto se pueden utilizar diferentes programas como Agisoft Photoscan, Rhinoceros o MeshLab. El software Agisoft es más complejo de usar porque para crear una buena malla requiere una gran cantidad de puntos. Por otra parte MeshLab es más usado en la impresión de objetos de menor tamaño, por lo tanto sus aplicaciones no son aprovechables en esta investigación. Mientras que Rhinoceros requiere pocos puntos para establecer la malla, además se pueden corregir posibles errores que se produzcan en la nube de puntos y es más amable para el usuario. De esta malla tridimensional se crea una especie de sólido digital con el cual se puede calcular el volumen excavado. Al realizar mediciones periódicas de este volumen podremos realizar un control de avance en las excavaciones.

## **4. Preguntas de Investigación e hipótesis**

Para esta investigación se plantean las siguientes preguntas

### **Pregunta general**

- ¿Cómo se puede utilizar la fotografía como método de control de avance en una excavación?

### **Preguntas específicas**

- ¿Cómo se capturan las fotografías en terreno?
- ¿Cómo se genera la nube de puntos a partir de las fotografías?
- ¿Cómo se generan las mallas tridimensionales a partir de una nube de puntos?
- ¿Cómo calculo el volumen de excavación a partir de la malla tridimensional?

### **Hipótesis**

Para mejorar el control de avances de la excavación se puede utilizar fotogrametría, la que utiliza fotografías digitales captadas a nivel de suelo.

## 5. Metodología

La metodología utilizada para esta investigación comienza con la identificación del problema observado, el que era un control de avance de excavación de obra poco formal para el cálculo de volumen extraído. Posteriormente se hizo una revisión de la literatura sobre cómo se realiza el cálculo de volumen extraído actualmente y cómo se podría solucionar este problema. Esta revisión orienta la investigación hacia la fotogrametría como herramienta de medición de control de avance propuesto de una excavación. Luego se toma un caso de estudio y se investiga a fondo el método de control de avance actual. Cabe destacar que paralelamente se va creando el método de control de avance propuesto donde primero se hace una experimentación previa para entender el procedimiento a aplicar en el caso de estudio y luego se crea un método propuesto para aplicarlo a éste. Después de aplicar el método al caso de estudio se hace una estimación de errores de obstrucciones en la fotografía y al momento de calcular el volumen. Finalmente, luego de haber procesado todos los datos se formula un método propuesto definitivo y éste entrega resultados de forma y fondo. En la Figura 4 se se presenta un esquema aclaratorio de todas las tareas realizadas.

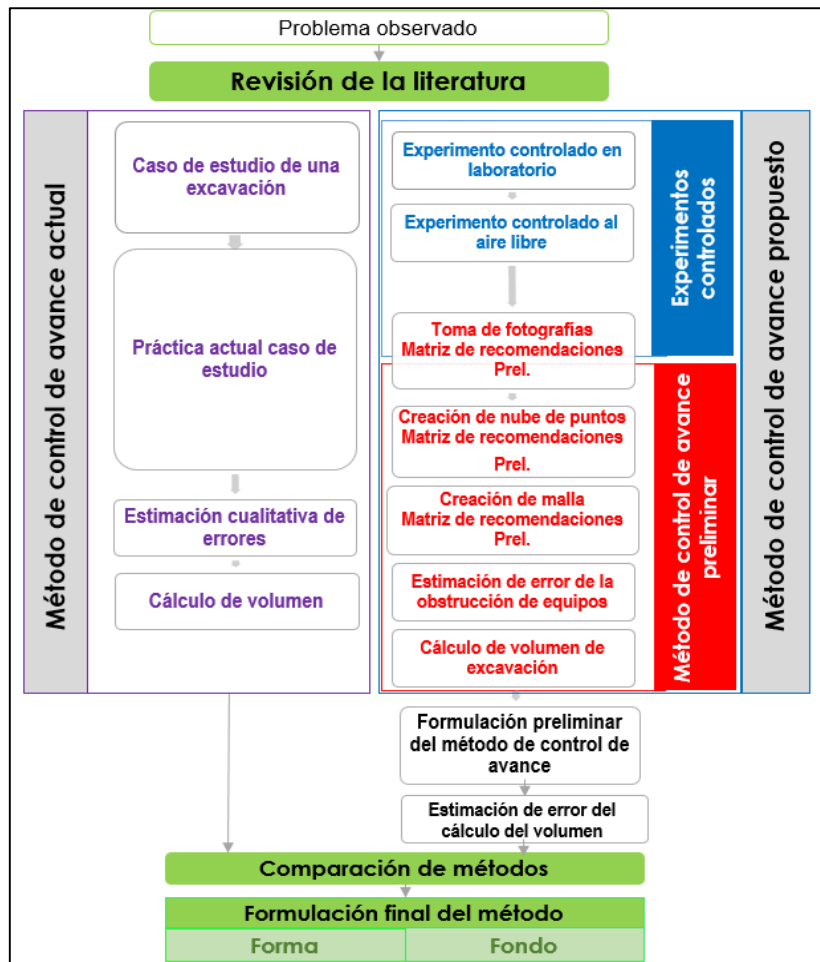


Figura 4. Tareas de investigación

## 5.1. Método de control de avance actual

Al momento de estudiar el método de control de avance actual se generan cuatro aspectos los que permiten visualizar el procedimiento actual para ejecutar las excavaciones.

### 5.1.1. Caso de estudio de una excavación

En esta investigación para conocer cómo funciona el método de control de avance actual se tomó como caso de estudio la excavación del Edificio Infinity Jazz ubicado en Gran Avenida N°4.681, al sur de la ciudad de Santiago de Chile. En esta etapa se recolectó toda la información geométrica para dimensionar la obra, correspondiente a planos y estudio de suelo. El edificio contará con una superficie aproximada de 2.000 m<sup>2</sup>, en el Anexo C se puede apreciar el plano de la construcción, tendrá una altura de 5 pisos 44 oficinas y dos subterráneos de estacionamientos, para esto se realizó una excavación aproximada de 21.000 m<sup>3</sup>. El edificio es una construcción de hormigón armado que cuenta con un plazo de 1 año para ser construido.

### 5.1.2. Práctica actual en un caso estudio

Luego se indagó en el proceder del método de control de avance utilizado, el que consiste en hacer un estimado de volumen de material extraído basado en la capacidad de la tolva de cada camión, razón por la cual el encargado cuenta la cantidad de camiones que salen de la obra con el material extraído y en base a esto se le hace el cálculo de volumen. A este procedimiento le llamaremos **“Método de control de avance de excavaciones actual”**. En la Figura 5 se puede ver una planilla donde se deja registro de cada camión que sale de obra, en ésta se plasman los datos del conductor y del camión. Los datos del conductor incluyen su nombre, cedula de identidad y la empresa a la que pertenece. En los datos del camión se deja registro de la patente, el color, la capacidad, la hora en que salió del establecimiento y cantidad de veces que pasó. Esta información permite calcular el volumen de terreno extraído diario haciendo sumatoria de las veces que pasó el camión por la puerta.



836

768  
338  
Bessie

Jueves 28/04/2016.- INGRESO DE VEHICULOS

Nº	FECHA	NOMBRE COMPLETO	C.I.	EMPRESA	PATENTE	COLOR GRABADO	HORA ENT.	HORA SAL.	OBSERVACIONES
1		FREDY TABLA	122324000	ALVARO	BH011-54	Amarillo	20:00		
2		ROBERTO RAMIREZ	181520006	"	BH011-58	"	20	000000 = 100	✓
3		HENRIQUEZ JESUS	8173021-5	"	PX011-54	BOLSA	14	000000 = 28	
4		RODRIGO TELLES	110854000	"	GT011-74	ROJO	18	000000 = 75	✓
5		RODRIGO GOMEZ T.	157033000	"	TY011-16	Amarillo	14	000000 = 70	✓
6		JOSUE GOMEZ	151052000	"	LP011-96	"	14	000000 = 70	✓
7		LUIS GOMEZ	060274-1	"	TY011-15	"	14	000000 = 70	
8		JOSUE TELLES	112525000	"	OL011-54	"	20	000000 = 120	✓
9		ALEX. TELLES	778301-1	"	XY011-06	ROJO	16	(10)	
10		MAURICIO SANDOVAL	103412000	"	MT011-39	ROJO	21	000000 = 105	✓
11		LUIS VILLALBA	992035000	"	HP011-73	ROJO	20	000000 = 120	✓
12		ALVARO TELLES	6205107-7	"	BT011-96	ROJO	19		
13									
14									758 h-

Figura 5. Planilla para el control de avance actual

Fuente: Fotografía extraída durante el proceso de conteo de camiones en obra.

### 5.1.3. Estimación cualitativa de errores

Dentro del desarrollo de la excavación se pudieron observar errores, los que se estiman de modo cualitativo. En primer lugar, la persona encargada de registrar la información era el guardia de la obra que sólo se encarga de contar camiones, quien no está capacitado debidamente para poder prever algún error. Por otro lado, el registro de información se realiza en una planilla informal, la que no deja ningún registro con el cual se pueda hacer un seguimiento de la información, además el ingeniero proyectista revisa la información sólo al término de la excavación para realizar los estados de pago sin realizar ningún control en su proceso. En la Figura 5 se puede ver cómo se lleva el control de avance actual donde se aprecia una planilla sucia e ilegible, que no permite visualizar el avance de la excavación.

Luego de revisar esta información se decide proponer un método de control de avance de excavación al cual se le llamara **método de control de avance de excavación propuesto (MCAEP)**.

### 5.1.4. Calculo de Volumen

Como se mencionó anteriormente, se realiza contando la cantidad de camiones que salen con el volumen extraído, la dimensión del camión será la capacidad del tolva y luego de haber contado la cantidad de camiones se hace la sumatorias de éstas.

## 5.2. Método de control de avance propuesto

Para realizar el MCAEP, primero se realiza una experimentación previa controlada en laboratorio y otra al aire libre, luego con el conocimiento aprendido de estas experiencias se aplica al caso de estudio del Edificio Infinity Jazz.

### 5.2.1. Experimentación previa

#### 5.2.1.1. Experimento controlando luminosidad y posición en laboratorio

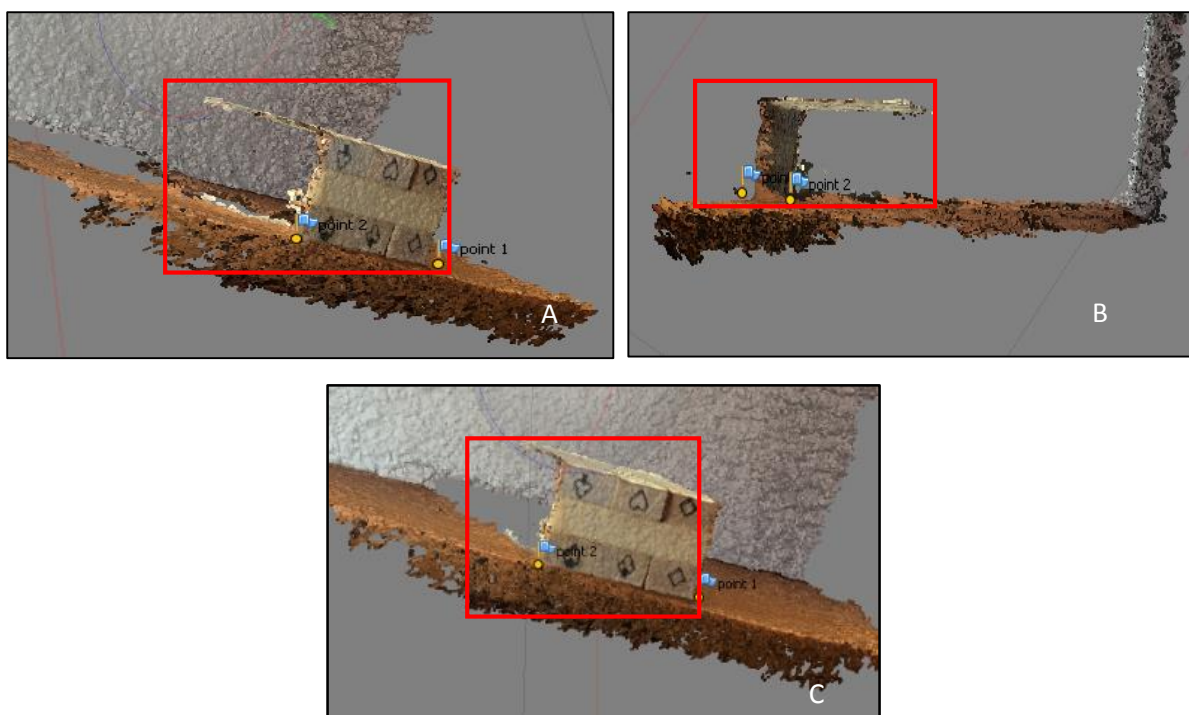
En primer lugar se realizó un experimento controlado en laboratorio el que consistió en modelar un objeto sólido como se ve en la Figura 6 en tres dimensiones con una nube de puntos con varios software 123catch, Agisoft Photoscan y ReCap de los cuales se eligió el programa Agisoft Photoscan profesional versión 1.2.0 debido a que tiene una interfaz amigable para el usuario y además puede generar la nube de puntos utilizando menos fotografías sin perder precisión.



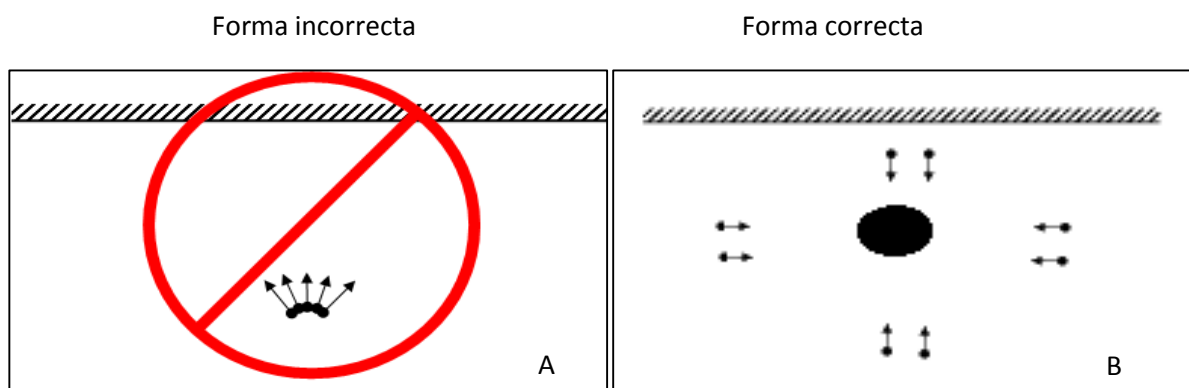
**Figura 6.** Objeto a representar en nube de puntos.

En la Figura 7.A y 7.B se observa la nube de puntos generada a partir del experimento controlando la luminosidad, esta nube de puntos se muestra defectuosa por utilizar una mala técnica en la toma de fotografías y en la Figura 7.C se ve una parte frontal bien definida debido a que la parte frontal es la que acapara más fotografías. Más adelante como se muestra en la figura 8.A se muestra que la toma de fotografías se realizó desde un punto fijo, mientras que la figura 8.B se representa como el fotógrafo debe desplazarse alrededor del objeto para crear una buena nube de puntos.





**Figura 7.** Experimentación previa donde se pueden notar los agujeros de un cubo de madera por tomar las fotos desde una sola posición.



**Figura 8.** Posiciones incorrectas y correctas.

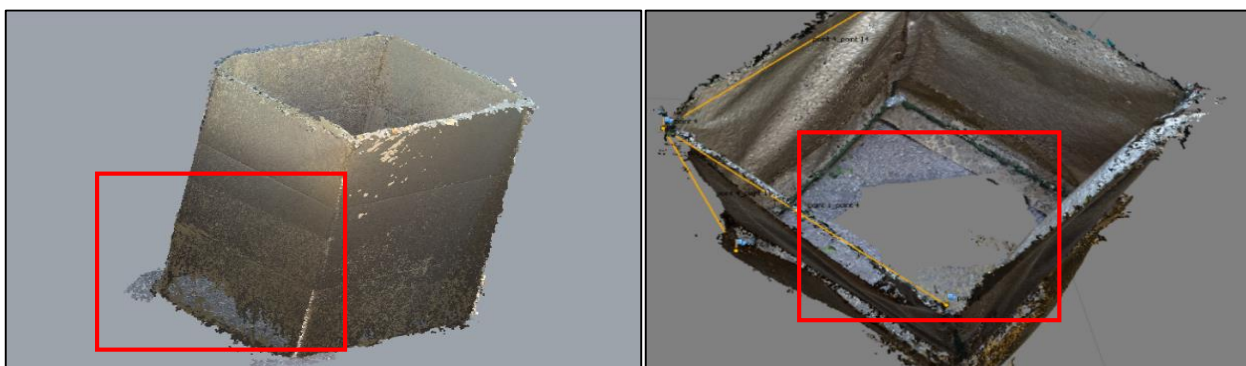
**Fuente:** Agisoft LLC., (2014).

### 5.2.1.2. Experimento al aire libre

Posteriormente se realizó un experimento al aire libre como se puede ver en la Figura 9, para ver cómo funcionaba el software en condiciones distintas de luminosidad y forma del objeto donde se pudo notar que en los lugares con sombra no se cerraba la nube de puntos adecuadamente como se puede ver en la Figura 10.



**Figura 9.** Experimento al aire libre.



**Figura 10.** En la experimentación previa al exterior con cajas se puede notar los agujeros producidos por sombras.

## 5.2.2. Método propuesto

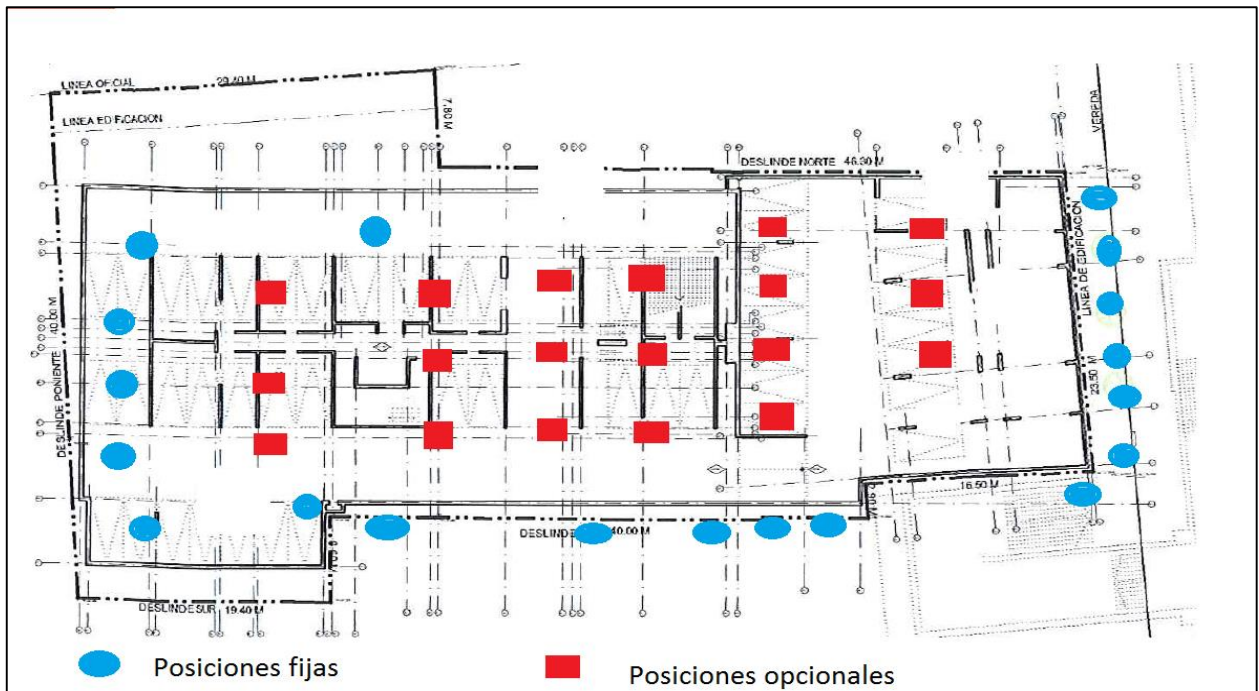
### 5.2.2.1. Diseño del método de toma de fotografías

En el caso de estudio se indagó cómo realizar el proceso fotogramétrico, el que comienza con la toma de fotografías en la excavación fijando parámetros iniciales como: puntos para sacar las fotografías, horario de toma de fotografía, para controlar las condiciones de luminosidad y las sombras, las que en ocasiones funcionan como obstrucciones al igual que las maquinarias presentes dentro de la excavación. La toma de fotografías como se puede ver en el Anexo A se hizo de lunes a viernes por un periodo de 30 minutos diarios en promedio, para poder dar con el horario donde existe una compatibilidad de condiciones, es decir que haya menos obstrucciones, pocas sombras y las posiciones despejadas para tomar las fotografía. Se tuvo que sacar fotografías en distintos horarios y se llegó a la conclusión que el mejor horario era a la hora de almuerzo de los trabajadores donde retiraban los camiones y había una buena luminosidad ya que está próxima al medio día que es cuando el sol tiene una mayor altura y produce menos sombras.

Para elegir la posición de la toma de fotografías se necesita generar el efecto estereoscópico (Montalvo, 2010), por lo tanto se definieron posiciones fijas que se puedan utilizar en cada momento de la excavación y que puedan unirse entre sí. Además las posiciones opcionales que servirán para unir las demás fotografías pero dependerán de si la excavación lo permite. Este procedimiento también está expuesto en la matriz de toma de fotografías con recomendaciones a considerar que se entrega al ingeniero a cargo que se puede ver más adelante en la Tabla1.

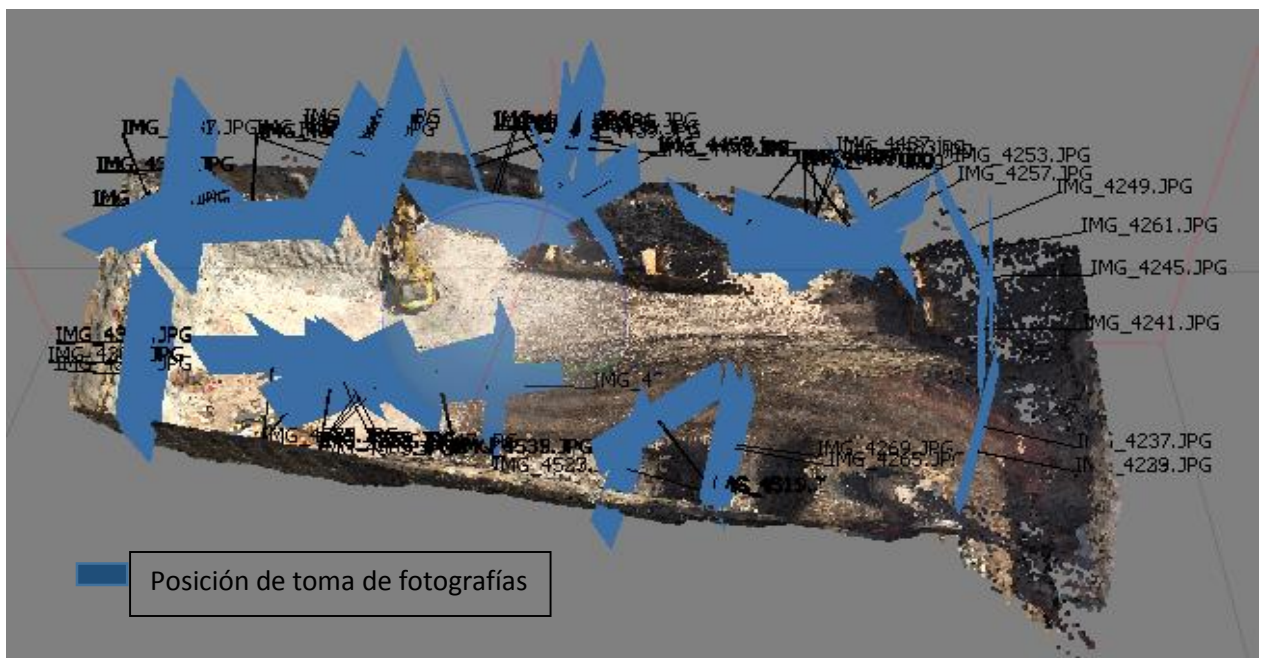
En la Figura 11 se muestra un plano con las posiciones utilizadas en el proceso, las posiciones azules son las posiciones fijas y que no se modifican en toda la excavación y las posiciones rojas son las posiciones opcionales que se deben tomar en medida que la excavación lo permita. Las fotografías tomadas desde las posiciones azules siempre se deberán tomar hacia el centro de la excavación para que puedan unirse con las otras fotografías logrando el efecto estereoscópico. Por lo tanto las fotografías en las posiciones rojas siempre deberán tener como referencia una posición azul.

Para lograr una buena nube de puntos se recomienda poner las posiciones cada 5 metros y que en la excavación haya siempre puntos de referencias permanentes de los cuales se pueda extraer una medida como por ejemplo un muro o crear un punto de referencia con una medida definida y ubicarlo por toda la excavación.



**Figura 11.** Posiciones para la toma de fotografías

En la Figura 12 se puede observar las posiciones que se utilizaron para tomar las fotografías, y así crear una nube de puntos. Estas posiciones permiten desarrollar el efecto estereoscópico para poder transformar la fotografía en un modelo en tres dimensiones.



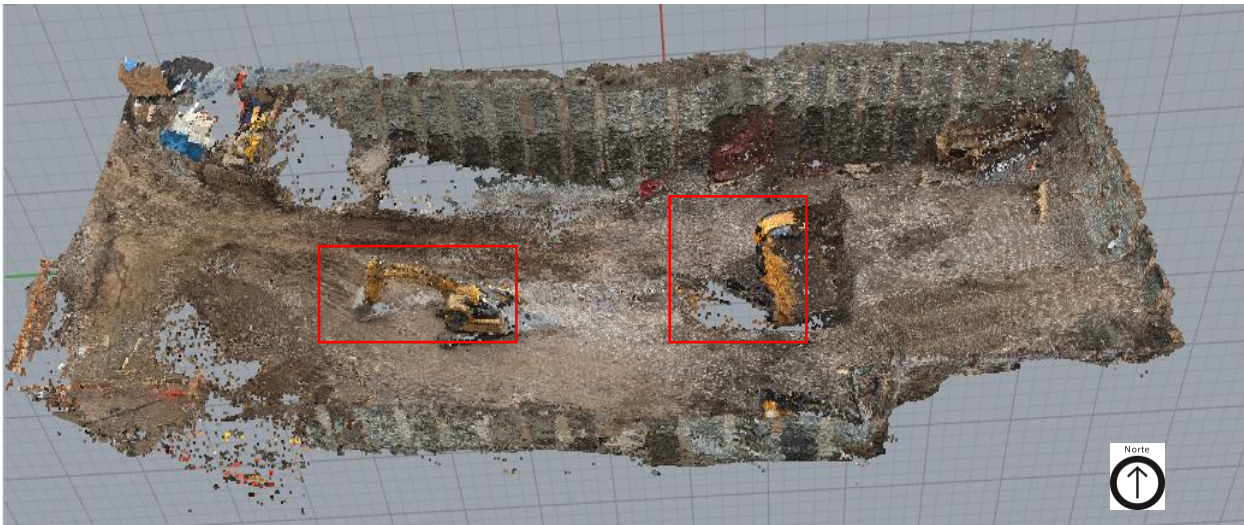
**Figura 12.** Posiciones reales de toma de fotografías. Día 2016/02/04. N° de puntos: 1.026.568. Cantidad de fotografías: 90.



#### 5.2.2.2. Generación de nube de puntos

Después se construyó la nube de puntos con el programa Agisoft Photoscan a través de la cual el software representa un modelo 3D a partir de las fotografías captadas en la excavación, las que deberán tener la información EXIF (Formato de archivo de imagen intercambiable), que trae consigo la información geográfica, horario de toma de fotografía, distancia al punto focal y calidad de imagen. Luego de realizar este proceso fue posible revisar si la toma de fotografías es suficiente para crear una buena malla tridimensional, esto se hace por simple inspección de la nube de puntos analizando si tiene agujeros o no, si se ve una gran cantidad de agujeros o una nube de puntos muy dispersa se debe considerar aumentar la cantidad de las fotografías y reconsiderar sus posiciones. Para la generación de la nube de puntos se requiere de un computador con un procesador promedio de uso de oficina técnica, con lo que el software tardará cerca de 2 horas en realizar la nube de puntos. Después de recopilar toda esta información se comienza el proceso de alineación de las fotografías y el software genera una nube de puntos dispersa. Finalmente se genera una nube de puntos densa desde la nube de puntos dispersa.

En la Figura 13 se muestra una imagen de una nube de puntos densa de la excavación, en esta se puede apreciar dos volúmenes pertenecientes a la maquinaria presente en la toma de fotografías. Los volúmenes de las obstrucciones se deben considerar al momento de calcular volumen total.



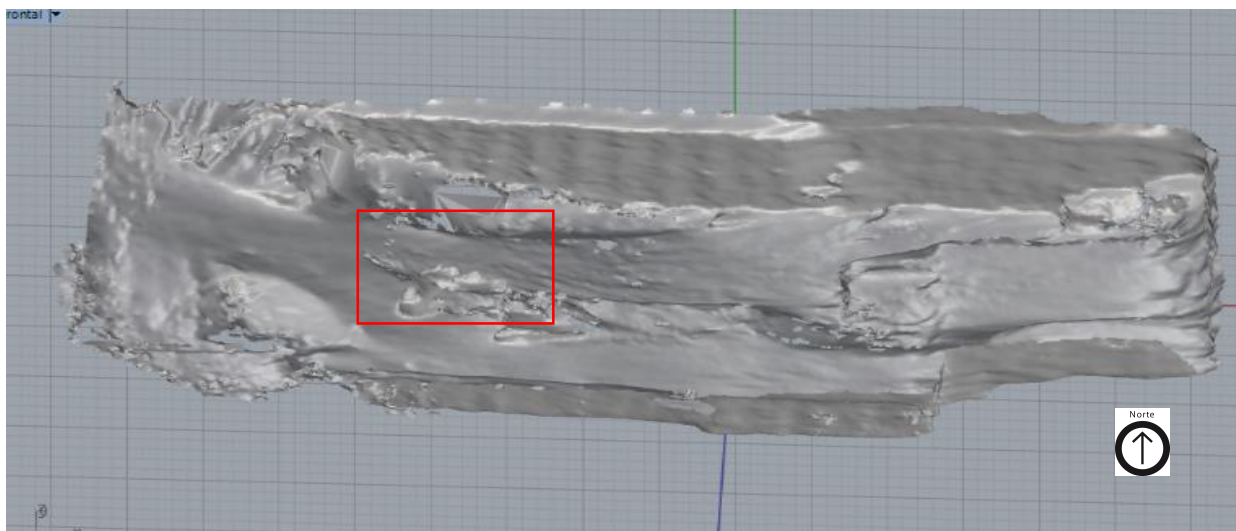
**Figura 13.** Nube de puntos Día 2016/01/27. N° de puntos: 1.482.289. Cantidad de fotografías: 72

#### 5.2.2.3. Generación de malla tridimensional

A continuación de haber creado la nube de puntos se procedió a realizar la malla tridimensional con Agisoft Photoscan, sin embargo no se creaba correctamente para nuestros usos porque le faltaban puntos donde quedaban espacios sin puntos, es decir, creaba una malla defectuosa. Por esta razón se decidió buscar un software distinto para crear la malla como es Rhinoceros. Este programa crea la malla de manera fácil para el

usuario. Luego de crear la malla se deberá generar un sólido desde la malla cerrándola como una caja y con esto el programa permitirá que se calcule el volumen de la excavación con una menor cantidad de puntos. El cálculo del volumen se realiza automáticamente desde el programa.

En la Figura 14 se presenta la malla tridimensional, esta se crea desde una nube de puntos.



**Figura 14.** Malla tridimensional Día 2016/01/27. N° de puntos: 1.482.289. Cantidad de fotografías: 72.

#### 5.2.2.4. Estimación de errores de maquinarias

Al momento de tomar las fotografías en una excavación se puede ver que siempre hay obstrucciones como se ve en la Figura 13 y Figura 14 destacado en rojo que podrían modificar el volumen, las maquinarias pesadas como los camiones tolva y la retroexcavadora siempre podrán obstruir la excavación por lo tanto se calcula el volumen de estas dos obstrucciones para luego considerarlo en el cálculo de volumen.

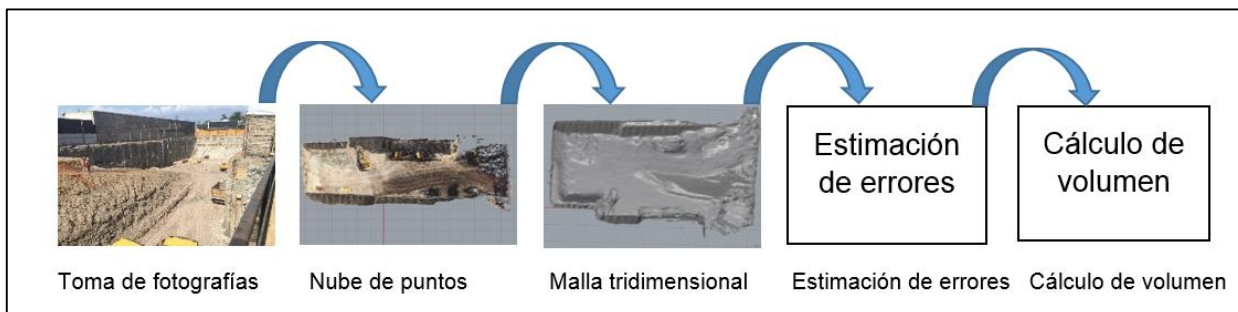
#### 5.2.2.5. Calculo de volumen de material extraído

Luego de calcular el volumen de movimiento de terreno a diario se pudo establecer que este método era viable para realizar el control de avances de la excavación.

Este control de avance calculado desde la fotogrametría se puede comparar con el que ha sido determinado con el método actual y así estimar el error con el MCAEP que se pudo haber producido.

Con toda esta información se pudo formular una metodología para llevar un control de avance más adecuado incluyendo a esta revisión aspectos de forma y fondo de los que se determina un método propuesto definitivo, creando una ficha de cotejo y recomendaciones para cada procedimiento.

Para finalizar el método propuesto se realiza un resumen del flujo de trabajo en la Figura 15 que se inicia con la toma de fotografías, seguido por la creación de la nube de puntos, para finalizar con la malla tridimensional y con esto poder estimar los errores y calcular el volumen final de la excavación.



**Figura 15.** MCAEP: Método de control de avance de excavaciones Propuesto.

## **6. Resultados**

En esta sección se mostrarán tres tipos de resultados: resultados de estructuración, numéricos y de forma.

### **6.1. Resultado de estructuración**

A partir de la experimentación de la fotogrametría, se obtiene el MCAEP, el que propone una metodología distinta a la actual. En la Figura 16 se muestra el procedimiento para obtener el volumen de la excavación, que es una profundización del esquema mostrado en la Figura 15. Esta ampliación muestra los pasos técnicos a seguir para poder calcular el volumen.

Además, de este mapa conceptual se desprenden tres matrices con recomendaciones, una para el procedimiento de toma de fotografías, otra para la creación de la nube de puntos y una tercera para la creación de la malla tridimensional. Estas buscan guiar al usuario en el método de control de avance de excavaciones propuesto.

Las matrices de recomendaciones comienzan siempre en su primera columna con la aplicación del método empezando por la revisión de la literatura, en donde se recopila información útil para llevar el procedimiento, también surge a partir de la aplicación de la teoría en una experimentación previa y después la ejecución de lo aprendido en un caso de estudio de donde derivan nuevas recomendaciones. Las recomendaciones se agrupan en tres o cuatro categorías enunciadas en la fila superior de la matriz.



### 6.1.1. Mapa conceptual del método de control de avance de excavaciones propuesto.

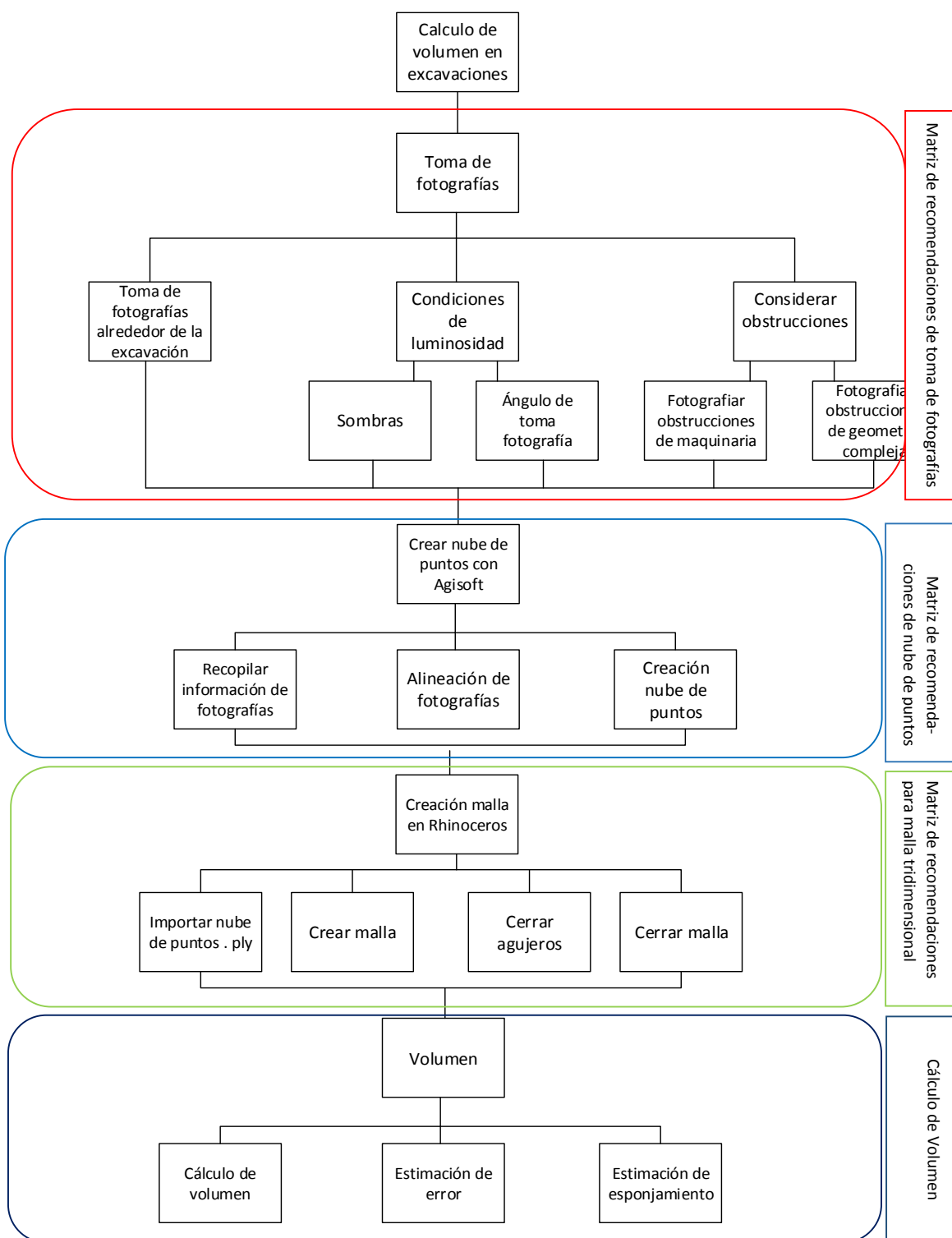


Figura 16. Mapa conceptual del método de control de avance de excavaciones propuesto.

### 6.1.2. Matriz de recomendaciones para la toma de fotografías

La Tabla 1 de recomendaciones para la toma de fotografías se realiza para que el usuario cometa menos errores al utilizar el método y tenga en consideración cómo tomar la fotografía, dónde tomar la fotografía, los campos visuales, condiciones de luminosidad, obstrucciones de maquinarias y geometrías complejas. Estos fueron los puntos más conflictivos para generar una nube de puntos correcta. Por lo tanto, se persigue estandarizar el procedimiento y además se deben considerar para tener un futuro trabajo exitoso.

Tabla 1: Matriz de Recomendaciones para la toma de fotografías

Recomen- daciones  Método	Toma de fotografías y campo visual	Condiciones de luminosidad	Obstrucciones de Maquinaria	Geometrías complejas (irregularidades)
<b>Bibliografía</b>	Manual de Agisoft Photoscan (Agisoft, 2014).	(Golparvard-Fard, 2010)	(Golparvard-Fard, 2010)	(Golparvard-Fard, 2010) (Braun, 2015)
<b>Experimentos previos</b>	Fotografiar alrededor de los objetos.	Fotografiar objetos sólidos con luminosidad controlada y no controlada.		
<b>Caso de estudio</b>	<p>Ubicarse en varias posiciones alrededor de la excavación como se indica en la Figura 11, la que en este caso es rectangular, estas posiciones deben ser fijas por todo el transcurso de la excavación.</p> <p>Se deben considerar fotografías desde el borde externo hacia adentro y desde el interior hacia afuera. Desde el exterior se deben tomar cada 5 m. Por cada lado de la excavación.</p> <p>Desde el interior se deben tomar fotografías que se transponen con las fotografías exteriores, esto para lograr el efecto estereoscópico y tener todo el campo visual de la excavación.</p>	<p>Tomar fotografías al medio día, cuando presente menos cantidad de sombras debido a que las sombras no permiten crear una nube de puntos homogénea.</p> <p>En los lugares donde se presenten sombras involuntarias se deberá fotografiar el lugar donde esté la sombra.</p>	Para poder estimar el volumen de obstrucción de una maquinaria se deberá fotografiar la maquinaria y estimar su volumen.	Las geometrías complejas se deberán fotografiar alrededor de ellas para que el software sea capaz de cerrar la nube de puntos donde estas geometrías crean sombras que impiden la creación de nube de puntos correctamente.

### 6.1.3. Matriz de recomendaciones para la creación de nube de puntos

Cuando se abordó la creación de la nube de puntos se enfrentaron y resolvieron diferentes obstáculos. En la Tabla 2 se presentan sugerencias para que el usuario supere éstos con menor dificultad, se presentan las tres dimensiones fundamentales para poder crear la nube de puntos.

Tabla 2: Recomendaciones para crear la nube de puntos

Recomendaciones Método	Recopilar información	Orientación de las fotografías	Creación de nube de puntos
	Bibliografía	Manual de Agisoft Photoscan (Agisoft, 2014).	Manual de Agisoft Photoscan (Agisoft, 2014).
Experimentos previos	<p>Calibrar la cámara con Agisoft lens. (Éste calcula el error de la cámara para poder proyectar la imagen plana desde un lente curvo).</p> <p>Verificar la información EXIF de una fotografía.</p>	<p>Para orientar las fotografías se deben destinar los puntos clave por foto, estos puntos después permiten unirse con los puntos de otra fotografías que tenga las mismas cualidades, luego se deberá elegir la cantidad de puntos de enlace por fotografía en esta oportunidad se eligieron 2000, estos puntos elegirán 2000 puntos de las otras fotografías y se unirán para crear el modelo en 3 dimensiones.</p> <p>También se debe tener en cuenta que entre más puntos clave y puntos de enlaces se le den al proceso más se demorará.</p>	<p>Para crear la nube de puntos se deberá elegir la calidad que se quiere de la nube de puntos entre más alta sea la calidad mejor será el modelo pero mayor su cantidad de tiempo de procesamiento.</p> <p>También se deberá elegir la calidad de los mapas de profundidad este también tendrá que ser el mejor para así tener una buena nube de puntos.</p>
Caso de estudio	<p>Activar el posicionamiento geo referenciado para que el proceso de alineación de imágenes sea más rápido.</p> <p>Activar el sistema de coordenadas geográficas mundial para que así el programa sea capaz de ubicar las fotografías en la ubicación correcta.</p>	<p>Se debe definir la cantidad de puntos claves por fotografía y de puntos de enlace por fotografías para tener una nube de puntos con menos errores y así hacer que el proceso sea más breve.</p>	<p>Se deben definir los tiempos de cada parámetro para realizar la nube de puntos y la cantidad de fotos necesarias para poder realizar el trabajo y que así el ingeniero a cargo se pueda planificar a lo largo de la excavación</p>

#### 6.1.4. Matriz de recomendaciones para la creación de la malla

Debido a que el software Rhinoceros sirve para muchos procesos se resume en la Tabla 3 los necesarios para crear una malla tridimensional que permita calcular el volumen de la excavación.

Tabla 3: Recomendaciones para la creación de la malla.

Recomendaciones Método	Tratamiento de nube de puntos	Creación de malla	Cierre de agujeros	Cerrar mallas
<b>Bibliografía</b>	(Campen y Kobbel, 2014), (Campbell et al, 2008)	(McNeel et al, 2001)	(McNeel et al, 2001)	(McNeel et al, 2001)
<b>Experimentos previos</b>		En la experimentación previa se utilizó Agisoft Photoscan y la malla creada desde los puntos creaba picos por la falta de puntos por eso se recomienda usar Rhinoceros por que no necesita una gran cantidad de puntos para poder crear una malla tridimensional adecuada.	El proceso de cerrar agujeros de una nube de puntos en Agisoft es completamente automático y al hacerlo en una nube de puntos no tan densa desfiguraba la malla creada por lo tanto se recomienda utilizar Rhinoceros el que permite cerrar agujeros manual y automáticamente.	
<b>Caso de estudio</b>	En esta etapa del proceso el usuario deberá verificar consistencia en las unidades usadas en la nube de puntos en el software de origen y de destino, si no deberá escalar el modelo.  Como el modelo esta geo referenciado el modelo estará en la posición geo referenciada y por lo tanto su altura estará lejos del punto por lo tanto se deberá llevar el modelo a la coordenada 0 para un mejor trabajo y también para no tener mayor dificultades al rotar la nube a una posición recta.	Luego de haber posicionado la nube el programa podrá crear la malla, esta etapa es casi automática porque solo se necesita un comando el que estará encargado de unir todos os puntos. Se crea la malla para poder crear un sólido tridimensional y así poder calcular su volumen.	Los agujeros se producen por falta de puntos en la nube estos se deben cerrar porque pueden causar errores al calcular el volumen.	Se debe cerrar la malla con un plano para transformarlo a un sólido y poder calcular su volumen. Para esto se debe unir el plano a la malla para formar sólido un sólido y calcular el volumen.

## 6.2. Resultados numéricos

### 6.2.1. Porcentaje de error del volumen geométrico con respecto al volumen calculado con software

El volumen de material extraído de la excavación calculado a partir del conteo de camiones se calcula según la ecuación expuesta a continuación.

$$Volumen\ geométrico = \frac{Volumen\ por\ conteo\ de\ camiones}{1.3} \quad (1)$$

Llamaremos volumen geométrico al volumen obtenido por conteo de camiones, dividido por un factor corrector que es de 1.3 que corresponde al 30% de esponjamiento. Este valor es el típico valor utilizado en el suelo grava de Santiago.

También se estima el porcentaje de error que puede generar una máquina que obstruya la fotografía. Este porcentaje de error se estima de la misma manera que lo genera el software, primero se crea una nube de puntos de la máquina y luego una malla a la cual se le calcula el volumen para un camión tolva dio un valor de 65 m<sup>3</sup> y para una retro excavadora de 45 m<sup>3</sup> (se puede apreciar mejor en el Anexo D). La estimación de este error se puede ver en las Figuras 17 y 18.

Por otro lado, el volumen calculado por el software deberá ser enmendado con los volúmenes calculados de las obstrucciones dadas por la maquinaria presente al interior de la excavación, debido a que restan volumen acumulado en la malla, la estimación del volumen del camión se considera de 65 m<sup>3</sup> y el de la retroexcavadora de 45 m<sup>3</sup>, dependiendo de las maquinarias que salgan en las fotografías se le deberá sumar al volumen del software. Por lo tanto por regla de tres obtenemos que:

$$\% Error = 100 * \frac{volumen\ caculado\ por\ software + volumen\ de\ maquinaria}{volumen\ geometrico} \quad (2)$$



Figura 17. Nube de puntos de la retroexcavadora

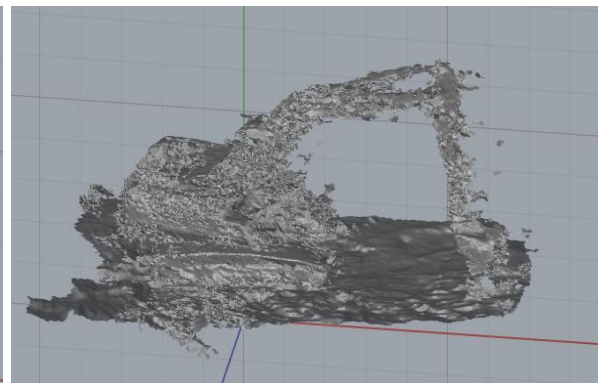


Figura 18. Malla tridimensional de retroexcavadora

En la Tabla 4, se muestran los porcentajes de error obtenidos de la comparación entre los resultados obtenidos por la medición del control de avance con el método actual y el método propuesto. Por ejemplo en la columna (1) observamos la fecha en que se toma

la muestra, en la columna (2) está el volumen calculado por conteo de camiones es de 885 mts<sup>3</sup>, en la columna (3) se aprecia la sumatoria de los volúmenes calculados a la fecha, en la columna (4) se aprecia el volumen geométrico acumulado, en la columna (5) se aprecia el volumen calculado por software, en la columna (6) se aprecia el volumen de la maquinaria, en la columna (7) se aprecia el volumen total entre el volumen acumulado por software más el volumen de la máquina y en la columna (8) se presenta el porcentaje de error entre el calculado por conteo de camiones y el calculado por software .

Tabla 4: Estimación porcentaje error de volumen

(1) Fecha de toma de fotografías	Resultados método actual			Resultados método propuesto			(8) % de error
	(2) Volumen por conteo de camiones (mts <sup>3</sup> )	(3) Volumen acumulado por conteo de camiones a la fecha (mts <sup>3</sup> )	(4) Volumen geométrico acumulado (mts <sup>3</sup> )	(5) Volumen calculado por software (mts <sup>3</sup> )	(6) Volumen de maquinaria (mts <sup>3</sup> )	(7) Volumen calculado por software más Maquinaria (mts <sup>3</sup> )	
19-01-2016	885	5.774	4.441	4.589	45	4.634	4
21-01-2016	850	7.519	5.783	5.917	240	6.157	6
25-01-2016	828	9.161	7.046	7.170	65	7.235	3
27-01-2016	836	10.867	8.359	9.047	130	9.177	10
28-01-2016	758	11.625	8.942	9.393	240	9.633	8
04-02-2016	686	15.424	11.864	12.412	260	12.672	7

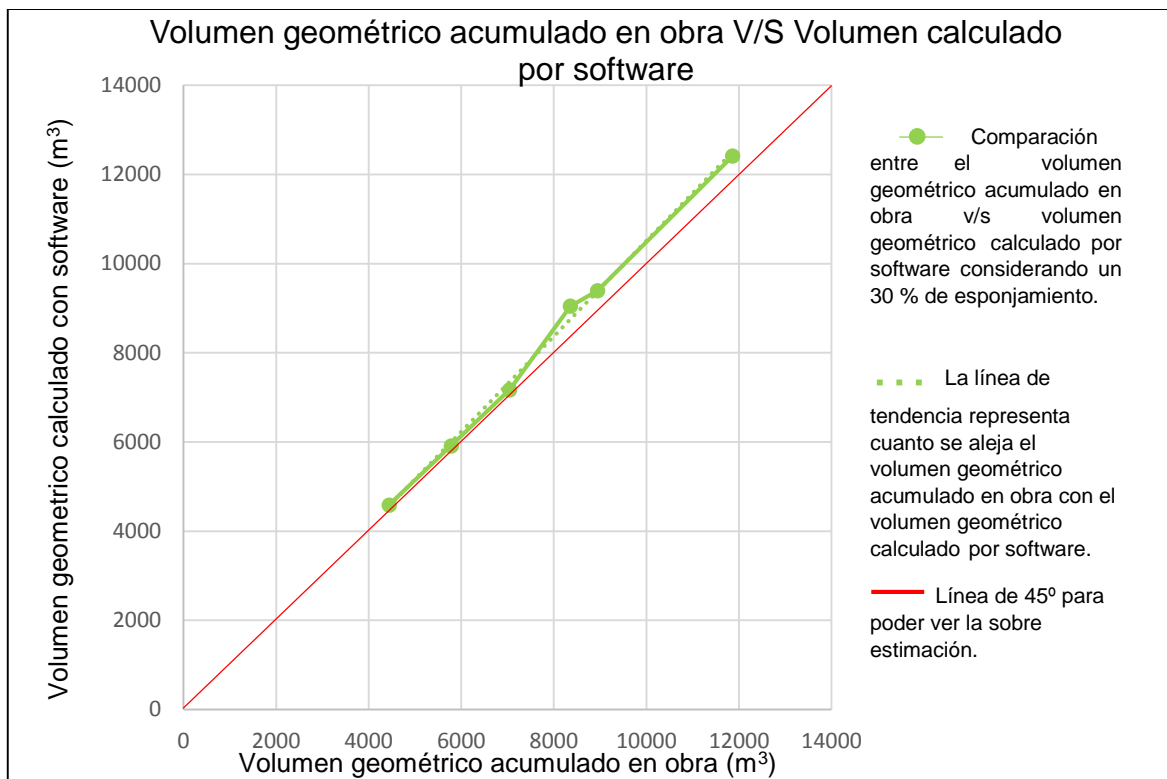
El porcentaje de error representa una sobrestimación del volumen debido a que el software hace un envolvente al solido cerrado que representa la excavación con una malla tridimensional.

### 6.2.2. Comparación entre el volumen geométrico acumulado v/s volumen calculado en software

Se extrae el volumen geométrico acumulado y el volumen calculado por software más el volumen de las maquinarias de la Tabla 3 para hacer una comparación en la Tabla 5, de donde se puede desprender que el método sobre estima el cálculo de volumen aproximadamente en un 6% el que se extrae del porcentaje de error. Por otra parte en el gráfico de la Figura 19, muestra que la línea de tendencia es paralela a la ideal de 45° y coincide bastante con ésta. En la Figura 19 se muestran 3 tipos de líneas: la línea punteada que es la línea de tendencia, la línea continua verde que muestra la fluctuación que tienen los porcentajes de error y la línea roja de 45° que sirve para comparar si el volumen calculado esta sobre estimado.

Tabla 5: Comparación volumen geométrico V/S volumen calculado por software

Fecha	Volumen geométrico acumulado (m <sup>3</sup> )	Volumen calculado con software más volumen de maquinaria (m <sup>3</sup> )	% de error
2016/01/19	4.441	4.634	4
2016/01/21	5.783	6.157	6
2016/01/25	7.046	7.235	3
2016/01/27	8.359	9.177	10
2016/01/28	8.942	9.633	8
2016/02/04	11.864	12.672	7
$\bar{X}$			6



**Figura 19.** Volumen geométrico acumulado en obra v/s Volumen calculado por software.

### 6.2.3. Comparación de la diferencia de volumen geométrico versus la diferencia de volumen calculado por software acumulado más maquinaria.

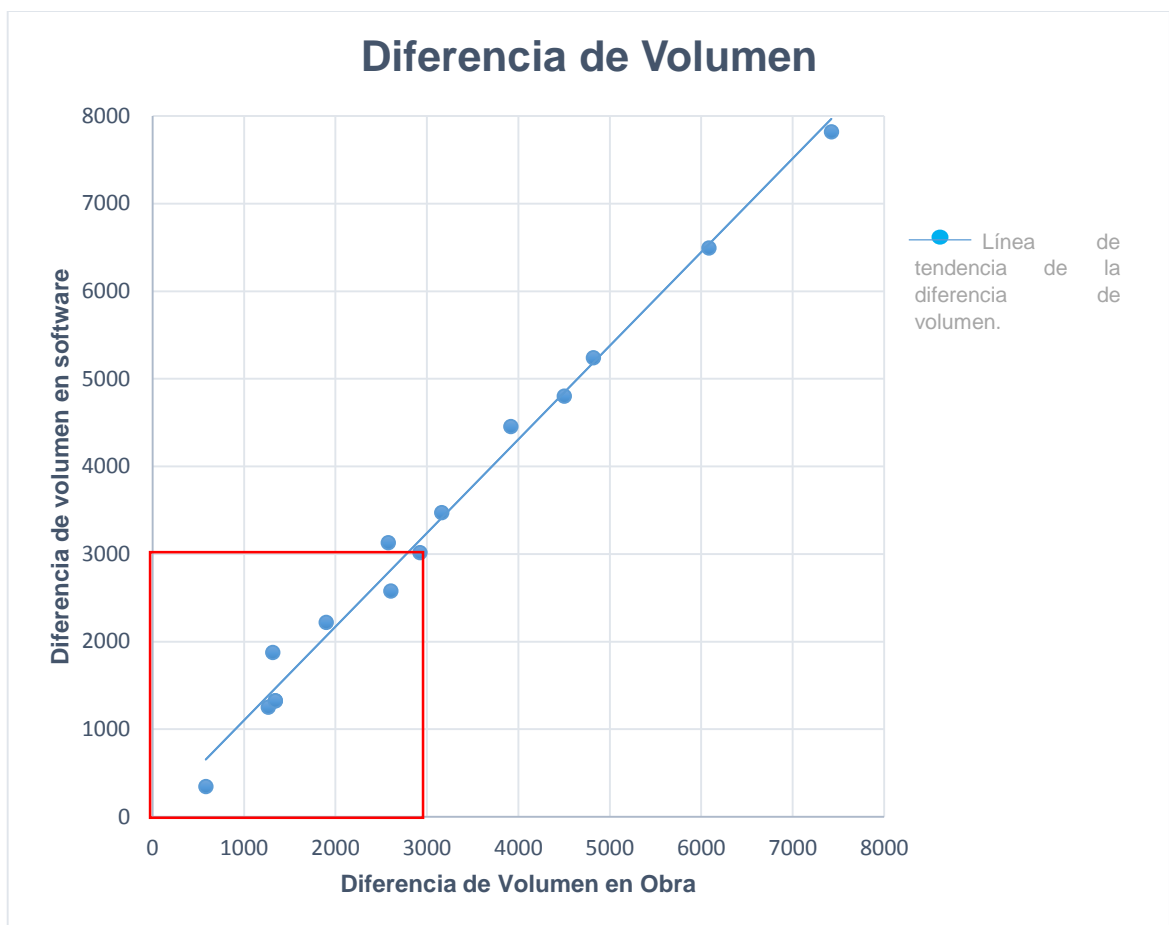
En la Tabla 6 se presenta el cálculo de la diferencia de volúmenes entre todas las muestras para poder notar que entre más avanzada este la excavación el método de control de avance de excavaciones es más exacto.

En la Figura 20 extraída de la Tabla 6 se puede observar que para volúmenes de movimiento de tierra menores que 3000 m³ (encerrado en el recuadro rojo) la dispersión es muy alta (en la Figura 20 se puede observar encerrado en rojo), Por lo tanto no es tan efectivo realizar el control de avance con un volumen menor a los 3000 m³ con el MCAEP, por eso se recomienda utilizar este método en el caso de estudio con una frecuencia semanal, debido a que la dispersión es menor con mayor cantidad de volumen acumulado. Además del grafico se puede ver que el método por software esta sobre estimado de lo que se calcula en obra con el método actual.



Tabla 6: Diferencia de volúmenes por fecha

Fecha	Delta volumen geométrico	Delta volumen calculado software	Días hábiles
$\Delta(19-21)$	1.342	1.523	2
$\Delta(21-25)$	1.263	1.078	4
$\Delta(25-27)$	1.313	1.942	2
$\Delta(27-28)$	583	456	1
$\Delta(28-04)$	2.922	3.039	5
$\Delta(19-25)$	2.605	2.601	6
$\Delta(19-27)$	3.918	4.543	8
$\Delta(19-28)$	4.501	4.999	9
$\Delta(19-04)$	7.423	8.038	14
$\Delta(21-19)$	1.342	1.523	2
$\Delta(21-27)$	2.576	3.02	6
$\Delta(21-28)$	3.159	3.476	7
$\Delta(21-04)$	6.081	6.515	12
$\Delta(25-28)$	1.896	2.398	3
$\Delta(25-04)$	4.818	5.437	8



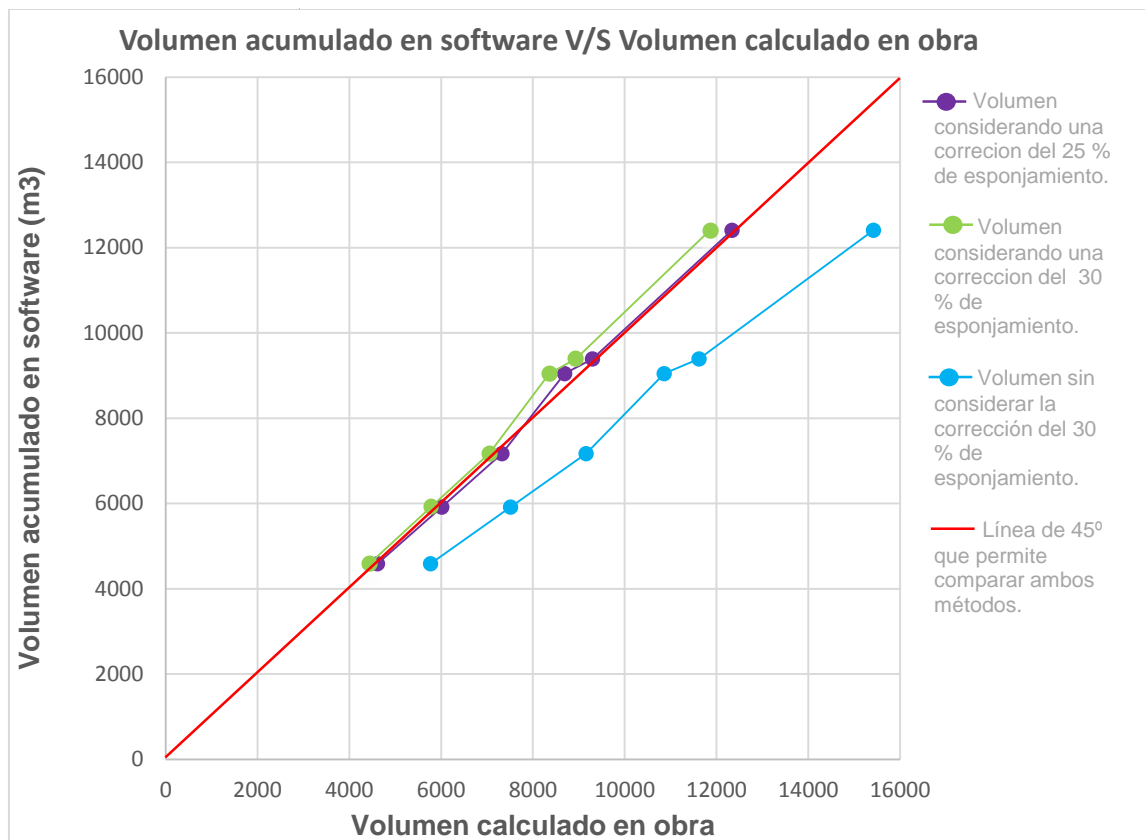
**Figura 20.** Comparación de diferencia de volúmenes

#### 6.2.4. Comparación entre el volumen acumulado por conteo de camiones versus el volumen calculado por software acumulado más máquinas.

De la Figura 21 se puede desprender que la estimación del esponjamiento está sobre estimado. Donde se observa que el esponjamiento que se utiliza habitualmente en excavaciones que es siempre un 30 % (línea verde) es mayor al observado con el MCEP que es de un 25 % (línea purpura). El cálculo de este se realiza comparando el volumen acumulado en obra considerando una corrección del 30% con el calculado por software que si fueran iguales seguirían la línea de 45° roja, además se puede observar en el grafico el valor real sin considerar la corrección del 30% de color azul y en la Tabla 7 se pueden ver los valores que dan vida al gráfico.

Tabla 7: Estimación del esponjamiento

fecha	volumen acumulado sin considerar corrección del 30% esponjamiento	volumen calculado con software	volumen acumulado considerando corrección del 30% esponjamiento	volumen acumulado considerando corrección del 25% esponjamiento
20160119	5773	4589	4441	4619
20160121	7518	5917	5783	6014
20160125	9160	7170	7046	7328
20160127	10867	9047	8359	8693
20160128	11625	9393	8942	9300
20160204	15423	12412	11864	12339



**Figura 21.** Estimación del esponjamiento

### 6.3. Resultados de forma

Los resultados de forma son la manera de presentar la información del control de avance en excavaciones. Para esto se crea una ficha de cotejo para que el ingeniero a cargo pueda registrar la información del avance de la excavación.

La información se registra en esta ficha con el objetivo de visualizar el avance de la obra de un modo gráfico y visual, y no solo en forma numérica. Así el ingeniero al revisar la información se le hará más fácil la visualización de ésta. La ficha también permite ver el volumen calculado a la fecha y además se puede ver la creación de una malla tridimensional desde fotografías en 2 dimensiones.

### 6.3.1. Ficha de cotejo

En la Figura 22 se puede ver la ficha de cotejo, la que fue creada con la finalidad de ordenar la información y también en el Anexo B se pueden ver los 6 casos de estudio. Esta permite observar el avance de la obra de manera gráfica, numérica y visual y además ayuda a ver el proceso realizado en software.

En la parte superior de la hoja se aprecia la fecha del día en que se tomó el control de avance y el nombre del proyecto, luego se presenta un gráfico que compara el cálculo de volumen obtenido en terreno con el cálculo de volumen valorado con software. Esta comparación sirve para verificar si ambos métodos están bien o se han producido errores, en la parte derecha de la hoja se observa una tabla donde se encuentran los valores numéricos extraídos por software y en terreno y que representan el valor de volumen acumulado extraído hasta la fecha.

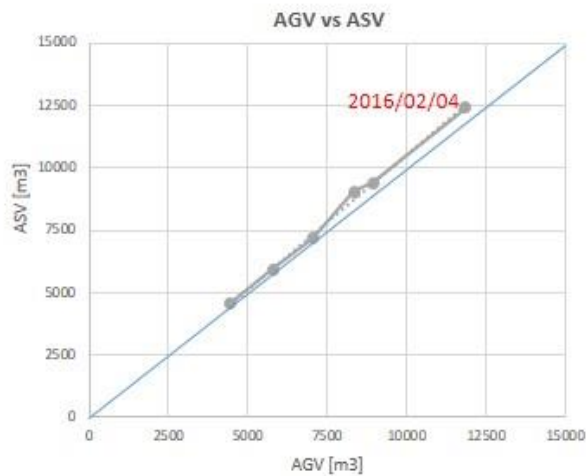
Más abajo se ve la cantidad de fotografías utilizadas para hacer el modelo y un resumen de fotografías que permiten ver qué nivel de avance lleva la excavación.

En el siguiente nivel se puede visualizar la cantidad de puntos utilizados y la digitalización de las fotografías en una nube de punto, este paso permite ver el modelamiento de una fotografía en dos dimensiones a un modelo en tres dimensiones. Luego se visualizan las mallas tridimensionales, que son la unión de las nubes de puntos y que permiten formar un sólido para calcular el volumen de la excavación. Por último, al final de esta ficha de cotejo está el nombre de quien hace el procesamiento de las imágenes y de quien toma las fotografías.

Después de haber rellenado la ficha de cotejo se pudo estimar el tiempo que toma este procedimiento que es de aproximadamente 3 horas, el procedimiento que más requiere tiempo es el de la nube de puntos ya que el software se demora en crear la nube, esto puede disminuir con procesadores más rápidos. La creación de la malla se puede estimar en media hora y la estimación de errores más el relleno de la ficha de cotejo otra media hora. Ya que el método funciona efectivamente para valores mayores aproximados de  $3000\text{m}^3$  se recomienda hacerlo 1 vez a la semana que es lo que demora la excavación en sacar esa cantidad.

Nombre del proyecto: Edificio Infinity Jazz

DATE: 2016/02/04

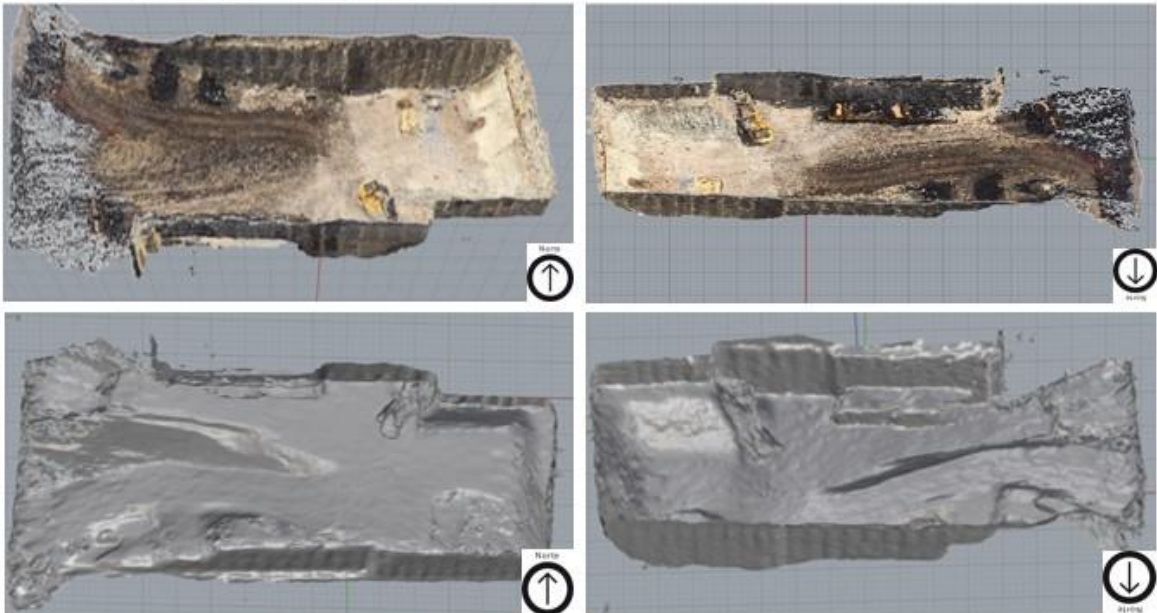


Volumen geométrico acumulado (AGV) [m3]	Volumen acumulado en software (ASV) [m3]
11.864	12.672

# Fotografías : 90



Numero de puntos : 1.026.568 points



FOTOGRAFO: Valeria Isamitt

FECHA (FOTOGRAFIAS) : 2016/02/04

NOMBRE DE QUIEN PROCESA LAS IMÁGENES EN SOFTWARE: Valeria Isamitt

Figura 22. Ficha de cotejo

## **7. Conclusiones**

En este estudio se evidencia que se puede llevar el control de avance de excavaciones de modo que se deje un catastro de su progreso de una manera adecuada, visible y entendible para los profesionales a cargo de la excavación utilizando fotografías.

Para el cálculo de volumen de la excavación se pueden distinguir tres herramientas fundamentales que son: la fotogrametría, la nube de puntos, y las mallas tridimensionales. La fotogrametría permitió modelar con fotografías la excavación en tres dimensiones en una nube de puntos y luego la malla tridimensional transformarla en un sólido para poder calcular el volumen de la excavación. Con esto se pudo desarrollar una metodología de trabajo para el profesional a cargo, la que consiste en guiar a este en el proceso del control de avance.

Luego de haber realizado varias muestras a un caso de estudio se pudo realizar una estimación de los porcentajes de error 6 % aproximadamente del método de cálculo de volumen propuesto. Al comparar el método actual con el método propuesto se pudo estimar un esponjamiento más real de la obra el que es de un 25% en vez del 30% estándar para ese tipo de excavaciones.

### **7.1. Contribución al conocimiento**

La investigación entrega contribuciones al conocimiento al área de control de avance en obra que se exponen en dos partes.

En primer, lugar se entrega un método para calcular el volumen con fotografías digitales geo-referenciadas, esta característica es común de los Smartphone, además se ofrece al profesional a cargo una metodología y recomendaciones para que lo pueda llevar a cabo.

Finalmente, este estudio entrega herramientas para estimar el porcentaje de error relacionado con las obstrucciones presentes en las fotografías generadas por maquinarias presentes en la excavación, se calcularon las obstrucciones utilizando el método propuesto para el cálculo de volumen el cual propone fotografiar las maquinarias, crear una nube de puntos y luego una malla tridimensional para estimar su volumen y abordar las obstrucciones que estas maquinarias producen en el procedimiento propuesto.

### **7.2. Importancia Práctica**

La importancia práctica de esta investigación para una excavación en desarrollo es que mejora el control de avance actual, dejando un registro periódico que puede ser utilizado para la planificación del ingeniero a cargo y para poder prever posibles atrasos de la excavación.

El método propuesto del cálculo de volumen con toma de fotografías permite al ingeniero calcular el volumen de manera directa con fotografías con una herramienta fácil de usar, trasladar y de conseguir.

Al dejar un registro claro de la excavación con una persona adecuada se disminuyen los posibles errores que se pueden producir en obra. Este método también permite visualizar en retrospectiva como progresó la obra de manera real, es decir nos presenta el as built de la excavación.

### **Limitaciones y futuras investigaciones**

Las limitaciones que se pueden encontrar al desarrollar la metodología, es que no se puede realizar a diario para una excavación que saque menos de 3000 m<sup>3</sup> por día, ya que aumenta el porcentaje de error.

Otro factor importante es que al momento de toma de las fotografías, se debe tener en cuenta las posiciones de las tomas de estas, debido a que la excavación va cambiando en todo momento

También se debe considerar que este método dedica 3 horas de tiempo por lo tanto es conveniente hacerlo una vez a la semana pero no todos los días.

Sugerencia para otras investigaciones:

- Se sugiere llevar una investigación, aplicando lo de esta tesis pero con otro tipo de instrumento como son los aviones no tripulados (UAV), debido a que facilitan la toma de fotografías en distintas posiciones. Esto debido a que las excavaciones llegan al contorno del terreno sin dejar una vía transitable para sacar fotografías y por el denso entorno urbano que puede dificultar la toma de fotografías.
- Otra alternativa es usar un láser escáner los que son capaces de crear nubes de puntos más densas y de mayor calidad.
- Finalmente la metodología y la ficha de cotejo pueden ser probados en casos adicionales y más refinados.



## Bibliografía

- Agisoft LLC. (2014). Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.1. Disponible en <http://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>
- Braun, A., Tuttas, S., Borrmann, A., & Stilla, U. (2015). Automated progress monitoring based on photogrammetric point clouds and precedence relationship graphs. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 32, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
- Build, F., Núñez, M. & Rodríguez, J. (2003). Fotogrametría analítica. (Vol. 79). Universidad politécnica de catalunya. España.
- Campbell, Vogiatzis, Hernandez, Cipolla, (2008). Using Multiple Hypotheses to Improve Depth-Maps for Multi-View Stereo, ECCV '08 Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision: Part I, Pages 766-779. Doi [10.1007/978-3-540-88682-2\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88682-2_58), University of Cambridge, Cambridge, Reino Unido.
- Campen, M., & Kobbelt, L. (2014). Quad layout embedding via aligned parameterization. In Computer Graphics Forum (Vol. 33, No. 8, pp. 69-81). RWTH Aachen University, Alemania.
- Golparvar-Fard, M. (2010). D4AR- 4 Dimensional augmented reality- models for automation and interactive visualization of construction progress monitoring. (Tesis doctoral) University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Jauregui, L. (2009). Documentación de sitios arqueológicos usando estereo-imágenes de formato pequeño (cámaras no métricas). Revista Geográfica Venezolana, Vol. 50(2) , 235-246. Venezuela.
- Ministerio de obras públicas (2012). Manual de carretera volumen N°5, Santiago de Chile.
- McNeeel & Associates, (2001). Rhinoceros, Modelador NURBS para Windows. Seattle, Estados Unidos.
- Montalvo, M. (2010). Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena (tesis de magister). Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

- Moscozo, L. (2011). Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para Edificios (tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Point Cloud Library (2011). Retrieved from <http://pointclouds.org/about/>
- Matabenítez, C., Toledo, M. & Mora, M. (2015). "Improving Planning in Congested Sites Using 3D and 4D Modelling: A Case Study of a Pile-Supported Excavation Project in Chile"- Conference Proceedings. 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015), University of Oulu, Finland, June 15-18. p139-146.
- Vogiatzis, G., Torr, P. H., & Cipolla, R. (2005). Multi-view stereo via volumetric graph-cuts. In 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) (Vol. 2, pp. 391-398). IEEE. Oxford Brookes University, Wheatley, Oxford, Reino Unido.

## Anexos

### Anexo A: Ejemplos de set fotográficos para cada semana.

Semana del 2016/01/04 al 2016/01/10

2016/01/04



2016/01/05



2016/01/08





Semana del 2016/01/11 al 2016/01/17

2016/01/11



2016/01/12



2016/01/13





Semana del 2016/01/18 al 2016/01/24

2016/01/19



2016/01/20



2016/01/21





Semana del 2016/01/25 al 2016/01/31

2016/01/25



2016/01/26



2016/01/27





Semana del 2016/02/01 al 2016/02/07

2016/02/02



2016/02/03

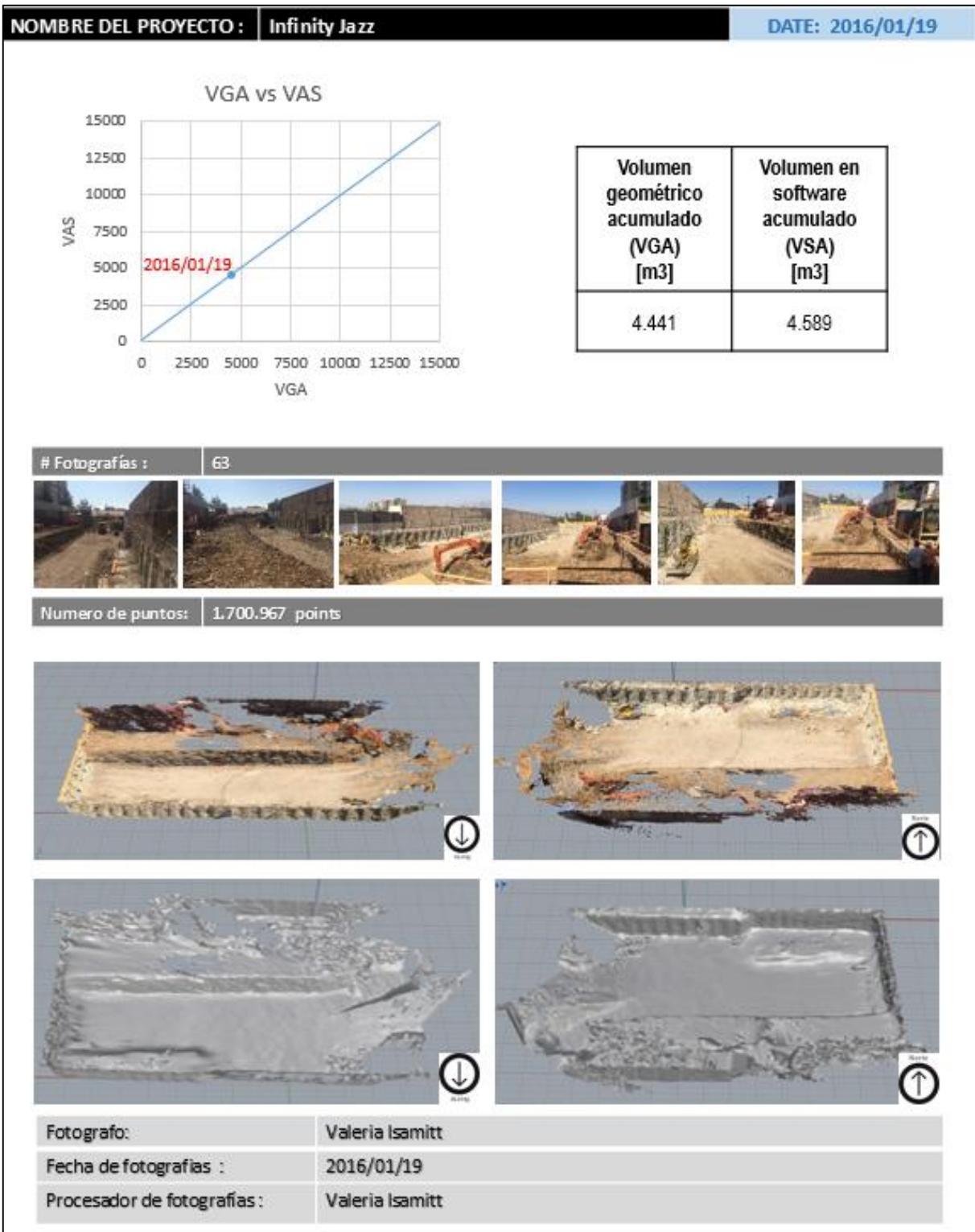


2016/02/04



## Anexo B: Malla y nube de puntos por fecha

Con los datos extraídos en terreno sólo se pudo construir estas mallas completas pese a que se sacaron fotos periódicas diarias.



Fecha: 19/01/2016 Cantidad de puntos: 1.700.967



VGA vs VAS

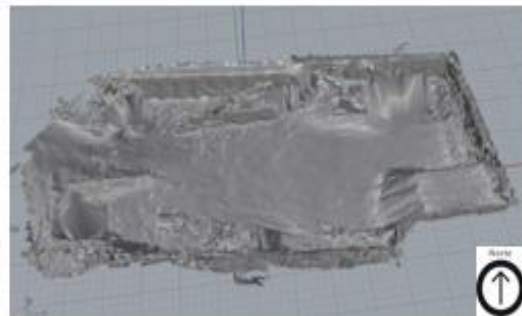
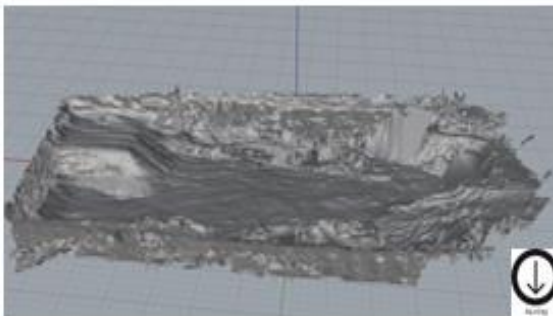


Volumen geométrico acumulado (VGA) [m3]	Volumen en software acumulado (VSA) [m3]
5.783	5.917

# Fotografías : 54



Numero de puntos: 2.447.047 points



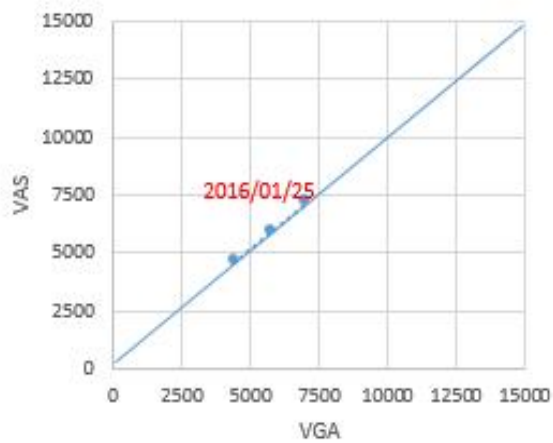
Fotografo: Valeria Isamitt

Fecha de fotografías : 2016/01/21

Procesador de fotografías : Valeria Isamitt

Fecha: 21/01/2016 Cantidad de puntos: 2.447.047

VGA vs VAS

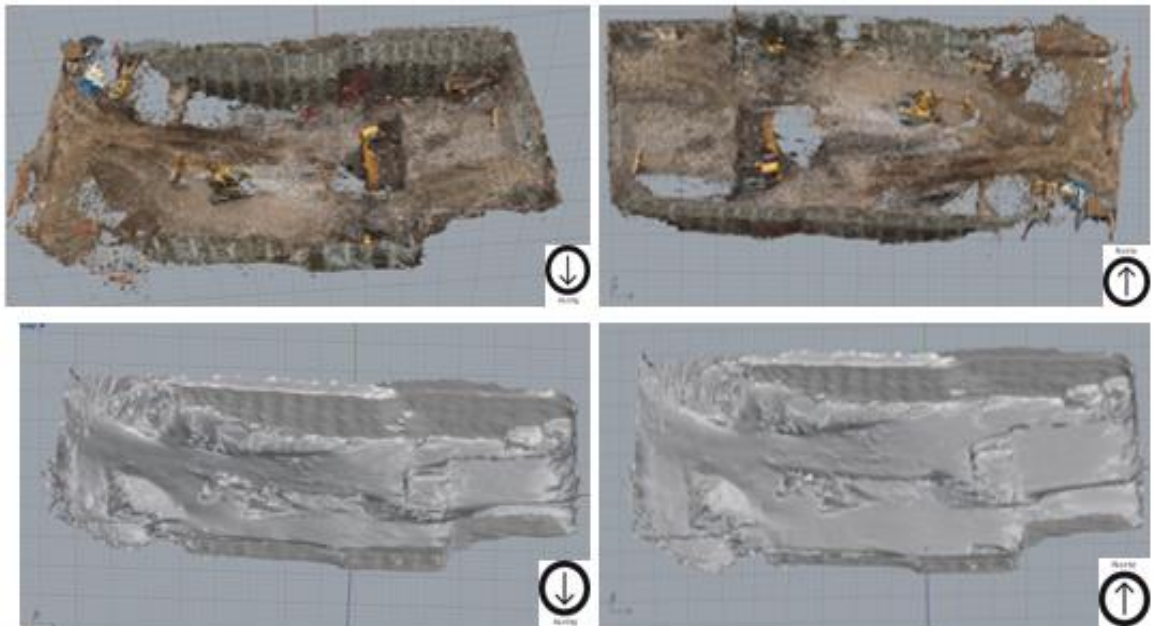


Volumen geométrico acumulado (VGA) [m3]	Volumen en software acumulado (VSA) [m3]
8.359	9.047

# Fotografías : 72



Número de puntos: 2.149.805 puntos



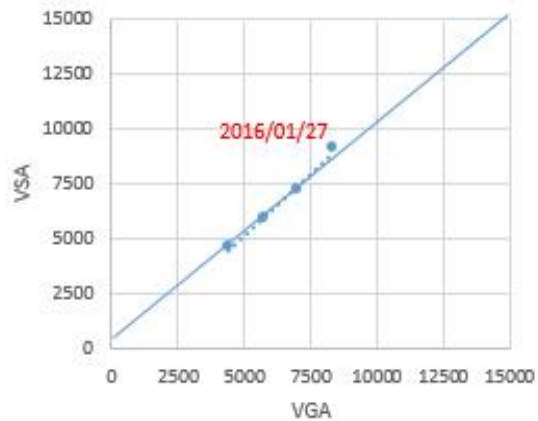
Fotografo: Valeria Isamitt

Fecha de fotografías : 2016/01/25

Procesador de fotografías: Valeria Isamitt

Fecha: 25/01/2016 Cantidad de puntos: 2.149.805

VGA vs VSA

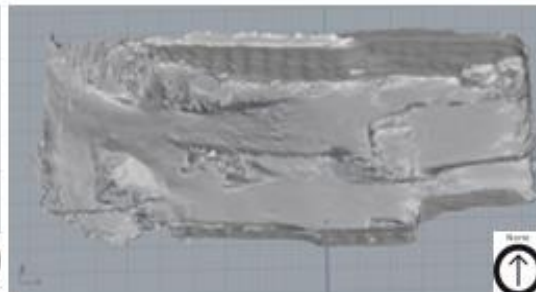
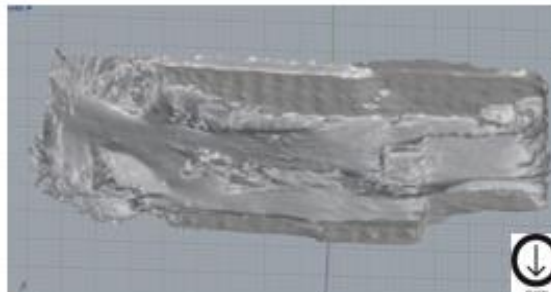
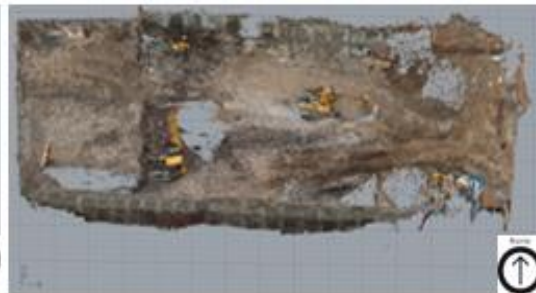
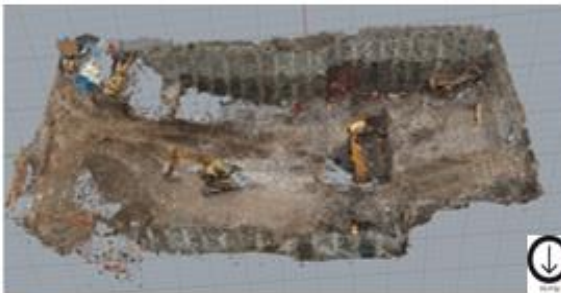


Volumen geométrico acumulado (VGA) [m3]	Volumen en software acumulado (VSA) [m3]
8.359	9.047

# Fotografías : 72



Número de puntos: 1.482.289 puntos



Fotografo: Valeria Isamitt

Fecha de fotografías : 2016/01/27

Procesador de fotografías : Valeria Isamitt

Fecha: 27/01/2016 Cantidad de puntos 1.482.289



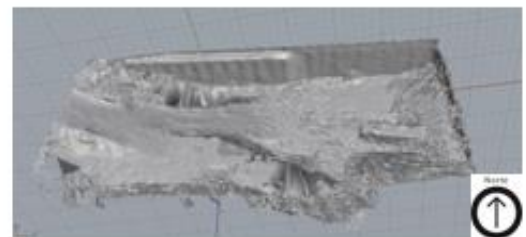


Volumen geométrico acumulado (VGA) [m3]	Volumen en software acumulado (VAS) [m3]
8.942	9.393

# Fotografías : 65

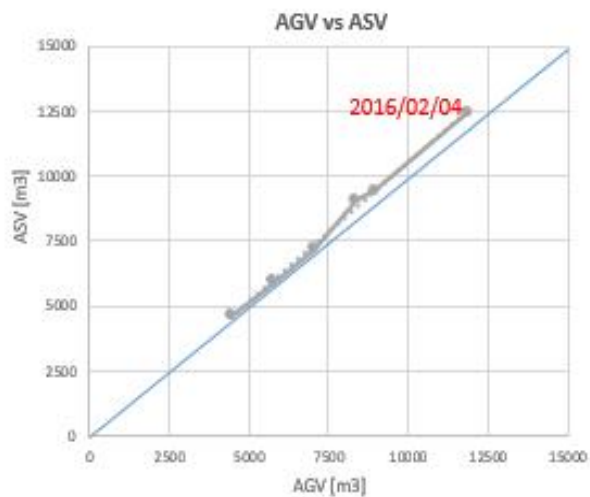


Número de puntos: 1.026.568 puntos



Fotografo:	Valeria Isamitt
Fecha de fotografías :	2016/01/28
Procesador de fotografías :	Valeria Isamitt

Fecha: 28/01/2016 Cantidad de puntos 1.026.568

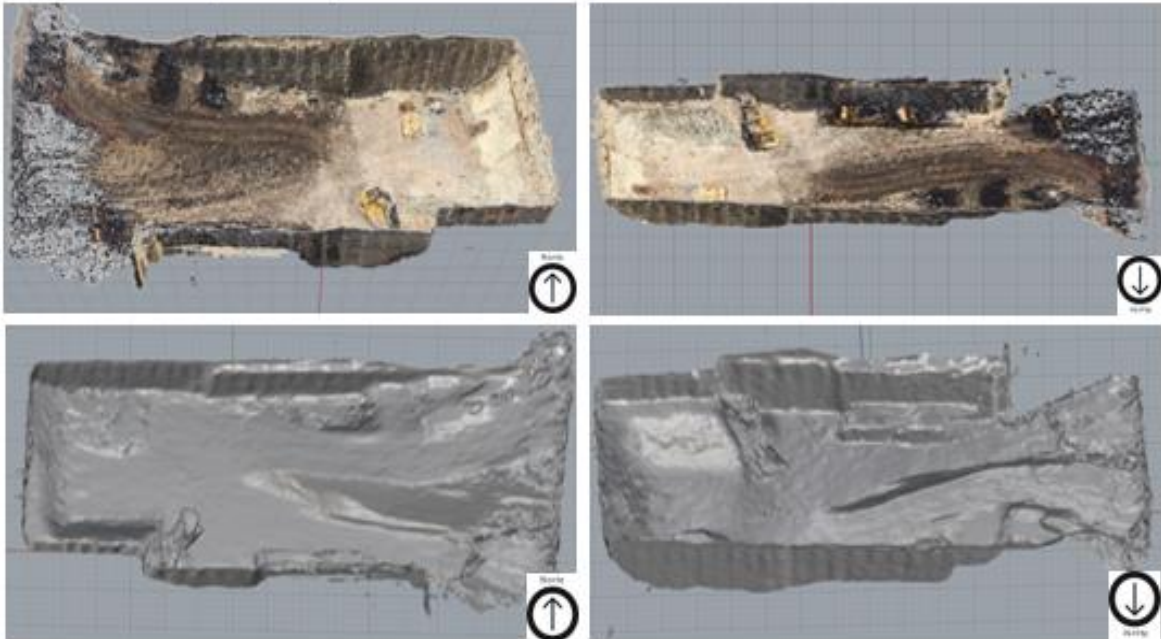


Volumen geométrico acumulado (AGV) [m³]	Volumen acumulado en software (ASV) [m³]
11.864	12.672

# PICTURES : 90



POINT CLOUD SIZE : 1.026.568 points



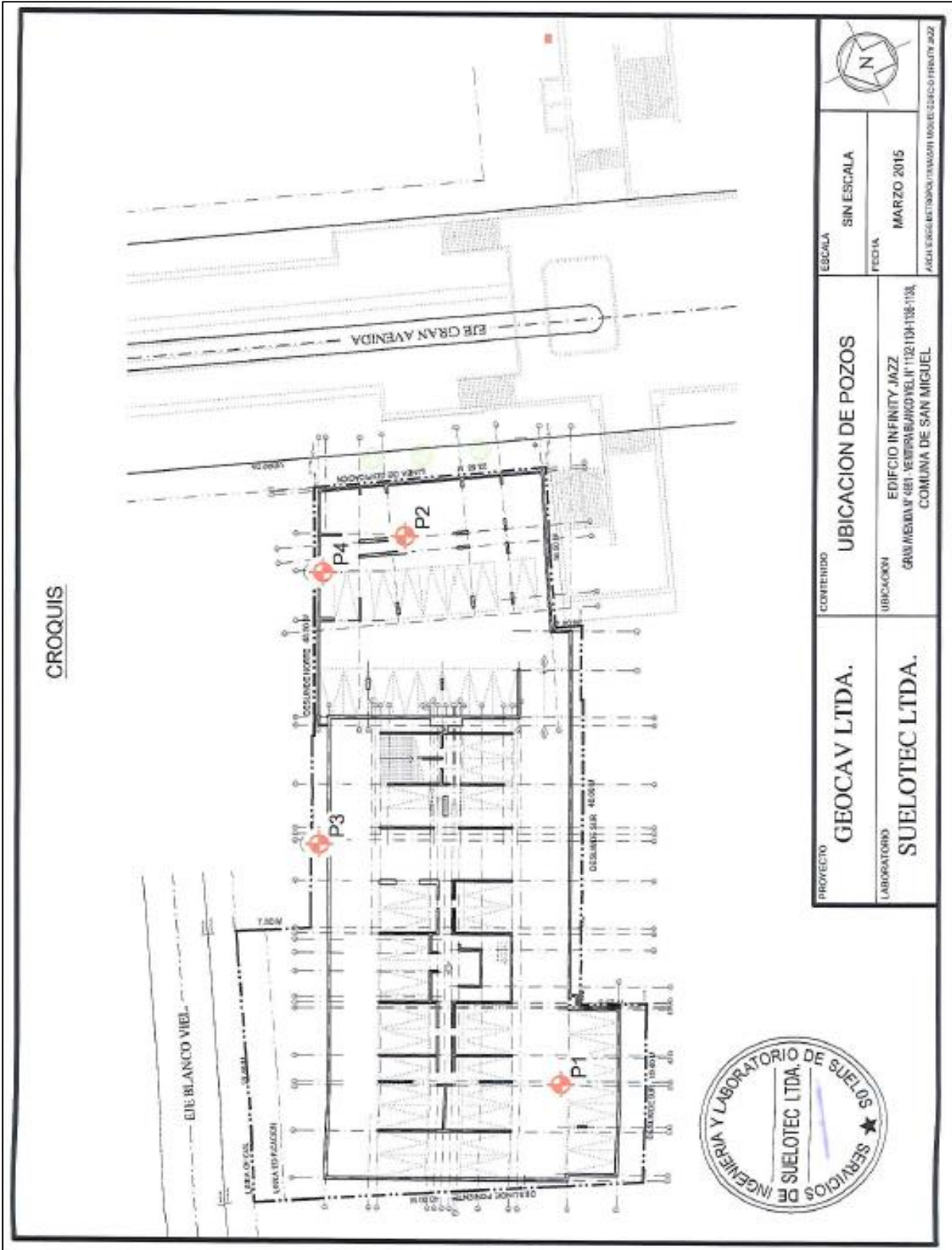
FOTOGRAFO: Valeria Isamitt

FECHA (FOTOGRAFÍAS) : 2016/02/04

NOMBRE DE QUIEN PROCESA LAS IMÁGENES EN SOFTWARE: Valeria Isamitt

Anexo C: Plano de obra

En el plano de la obra se puede ver la superficie que abarca y las calles con las cuales intersecta.





#### **Anexo D: Estimacion de error de maquinaria.**

El camion tiene un volumen aproximado de  $65 \text{ m}^3$  y la retro excavadora de  $45 \text{ m}^3$ .

